



*Российская Академия Наук*



*Отдел физической газодинамики*

# **Ускорение газового пламени и способ его подавления**

**Голуб В.В.**

*Доклад на Ученом Совете ОИВТ РАН 14 ноября 2018 года*

# Содержание

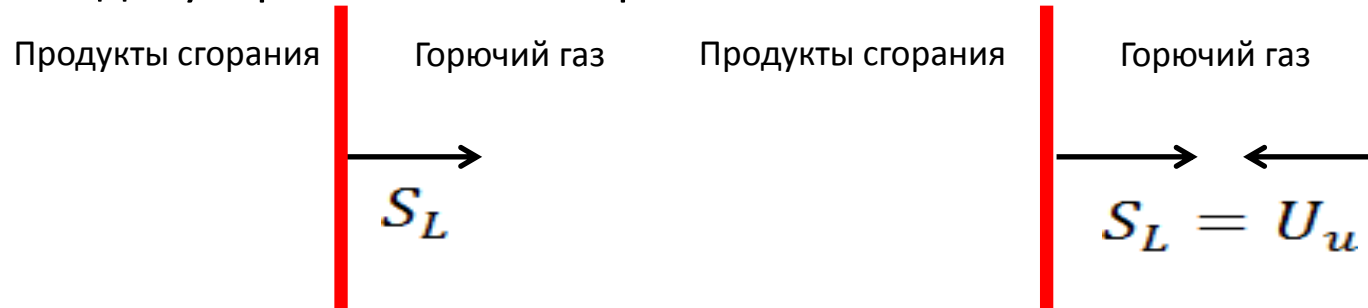
- Факторы влияющие на скорость фронта пламени
- Структура и динамика фронта пламени
- Разброс экспериментальных данных по развитию газовых взрывов
- Распространение газового пламени с отводом тепла



Факторы влияющие на скорость фронта  
пламени

# Ламинарная скорость пламени

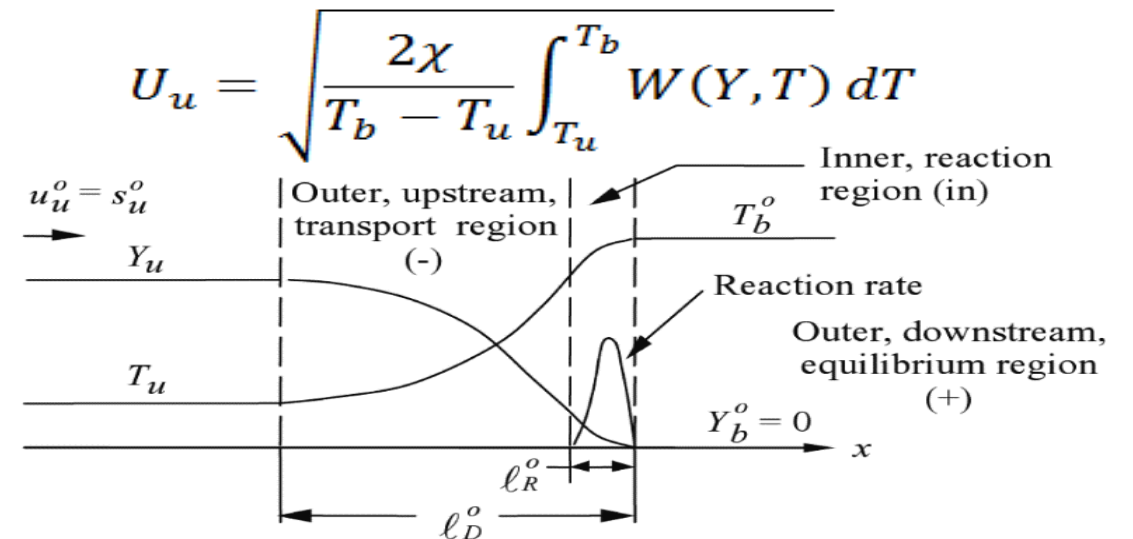
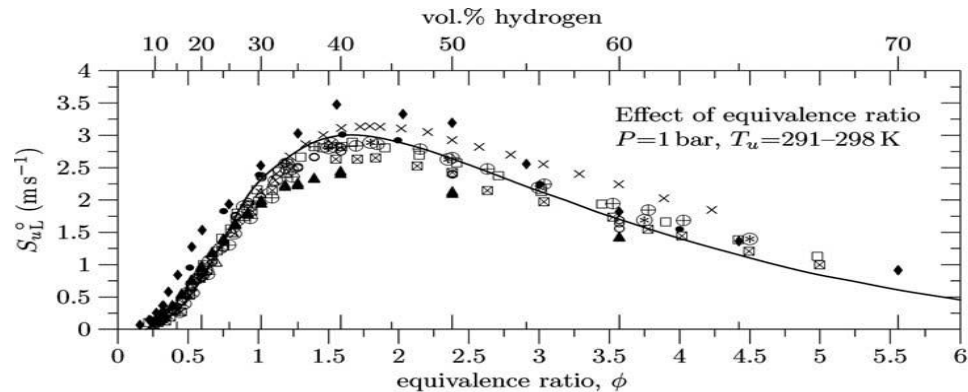
Скорость перемещения фронта пламени относительно несгоревшего газа в направлении, перпендикулярном к его поверхности.



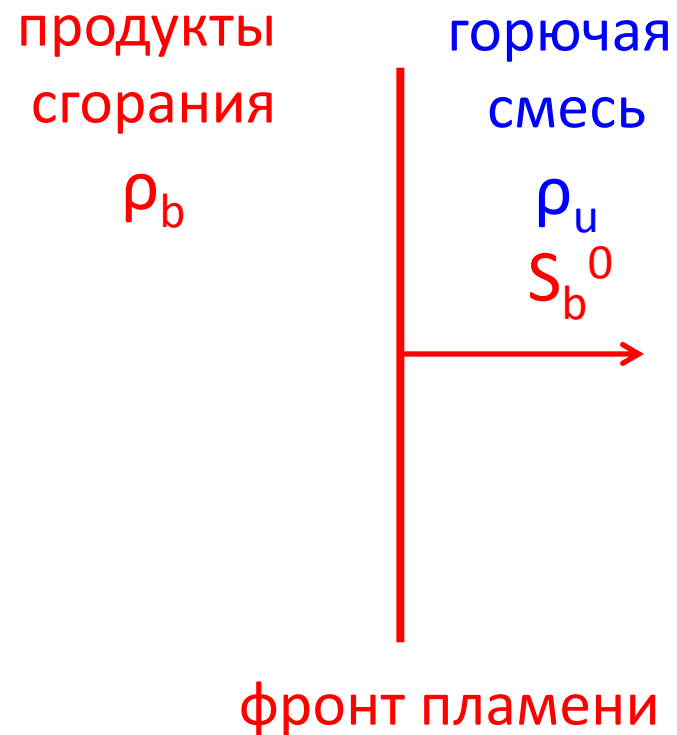
Зона реакции движется

Зона реакции неподвижна

Ламинарная скорость пламени, **не может быть измерена напрямую**; она вычисляется из экспериментальных данных с учетом поправок; либо теоретически.



# Тепловое расширения продуктов сгорания



Скорость видимого  
фронта пламени

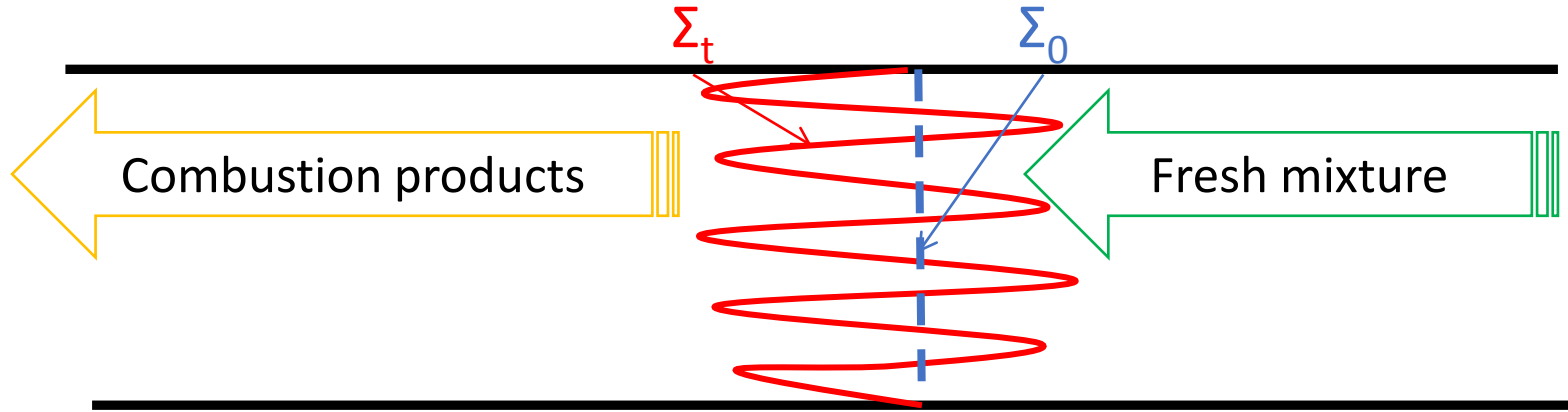
$$S_b^0 = \sigma S_u^0$$

Коэффициент  
теплового расширения

$$\sigma = \frac{\rho_u}{\rho_b}$$



# Деформации фронта пламени



$$W_{fresh\ mixture} = u_L \Sigma_T = u_T \Sigma_0$$

Одинаковое количество горючей смеси проходит через изогнутый фронт и через плоский фронт.



$$u_T = u_L \frac{\Sigma_T}{\Sigma_0}$$

Скорость фронта деформированного пламени превышает скорость плоского фронта в отношении площадей криволинейного фронта и плоского фронта.

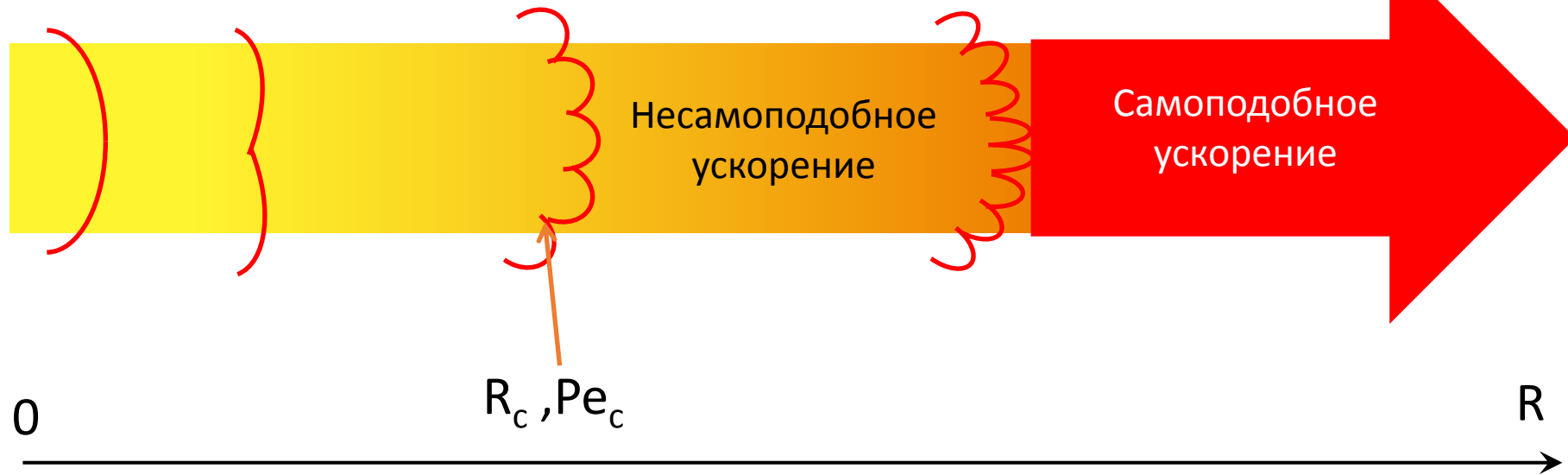
# Ускорение и форма фронта пламени

•Термо-  
диффузионная  
неустойчивость

•Термо-  
диффузионная  
• Дарье-Ландау  
неустойчивости

•Термо-  
диффузионная  
• Дарье-Ландау  
• Рэля-Тейлора  
неустойчивости

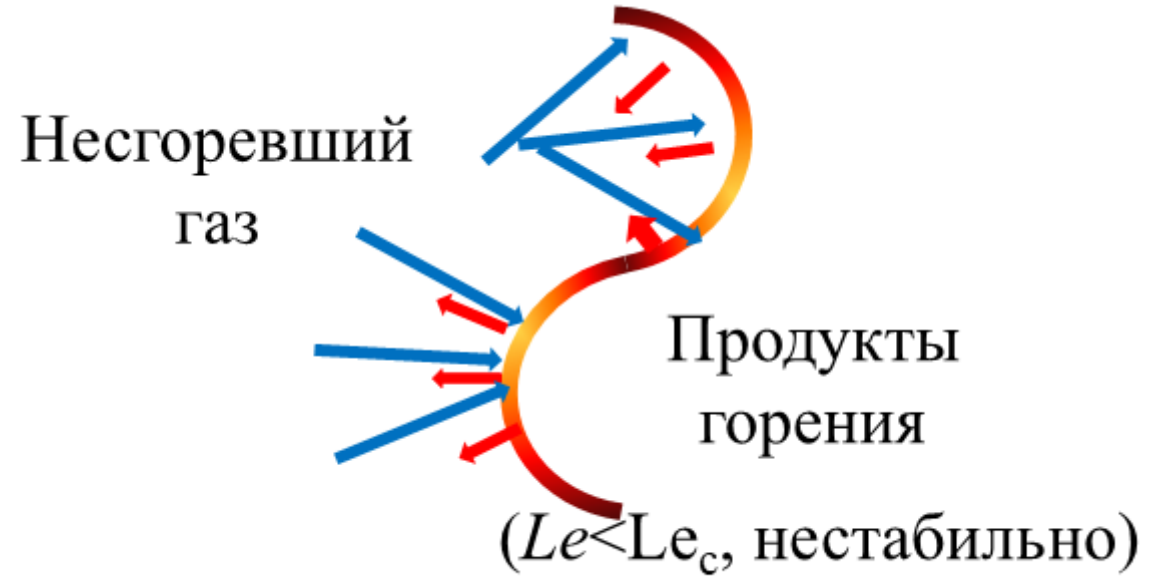
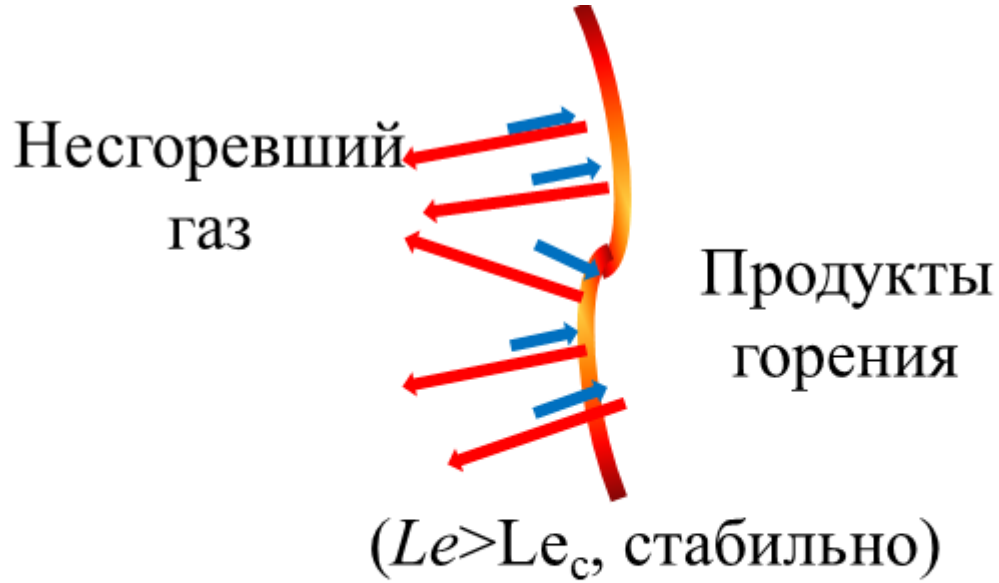
• Термо-  
диффузионная  
• Дарье-Ландау  
• Рэля-Тейлора  
неустойчивости  
• Турбулентность



$$Pe = \frac{R}{\delta} \text{ — число Пекле, } \delta \text{ — толщина фронта пламени, м}$$

# Термо-диффузионная неустойчивость пламени

Критерий Льюиса – отношение температуропроводности к коэффициенту диффузии недостающего реагента



$$Le = \frac{\chi}{D}$$

← Перенос тепла  
→ Перенос массы

Предельное значение числа Льюиса

$$Le_c = 1 - \frac{2}{Ze} = 0.75 \div 0.87$$

Мера чувствительности пламени к возмущениям -соотношение толщин слоя прогрева и слоя химической реакции-

$$Ze = \frac{E_a}{RT_b} \frac{T_b - T_0}{T_b}$$



# Гидродинамическая неустойчивость Дарье-Ландау

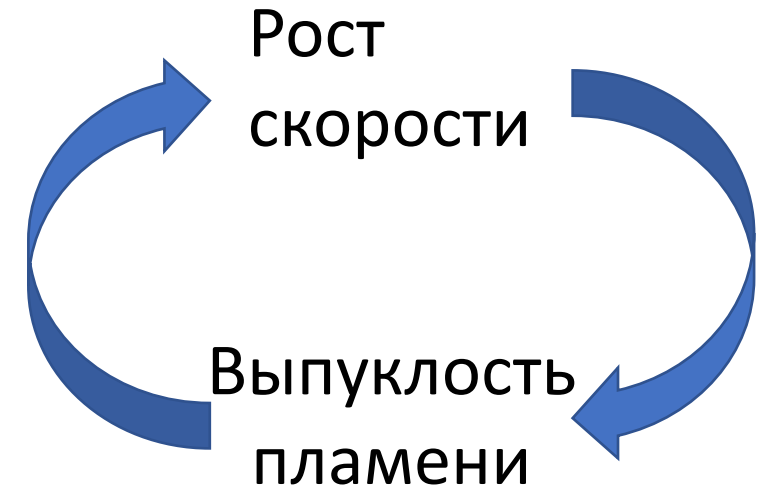
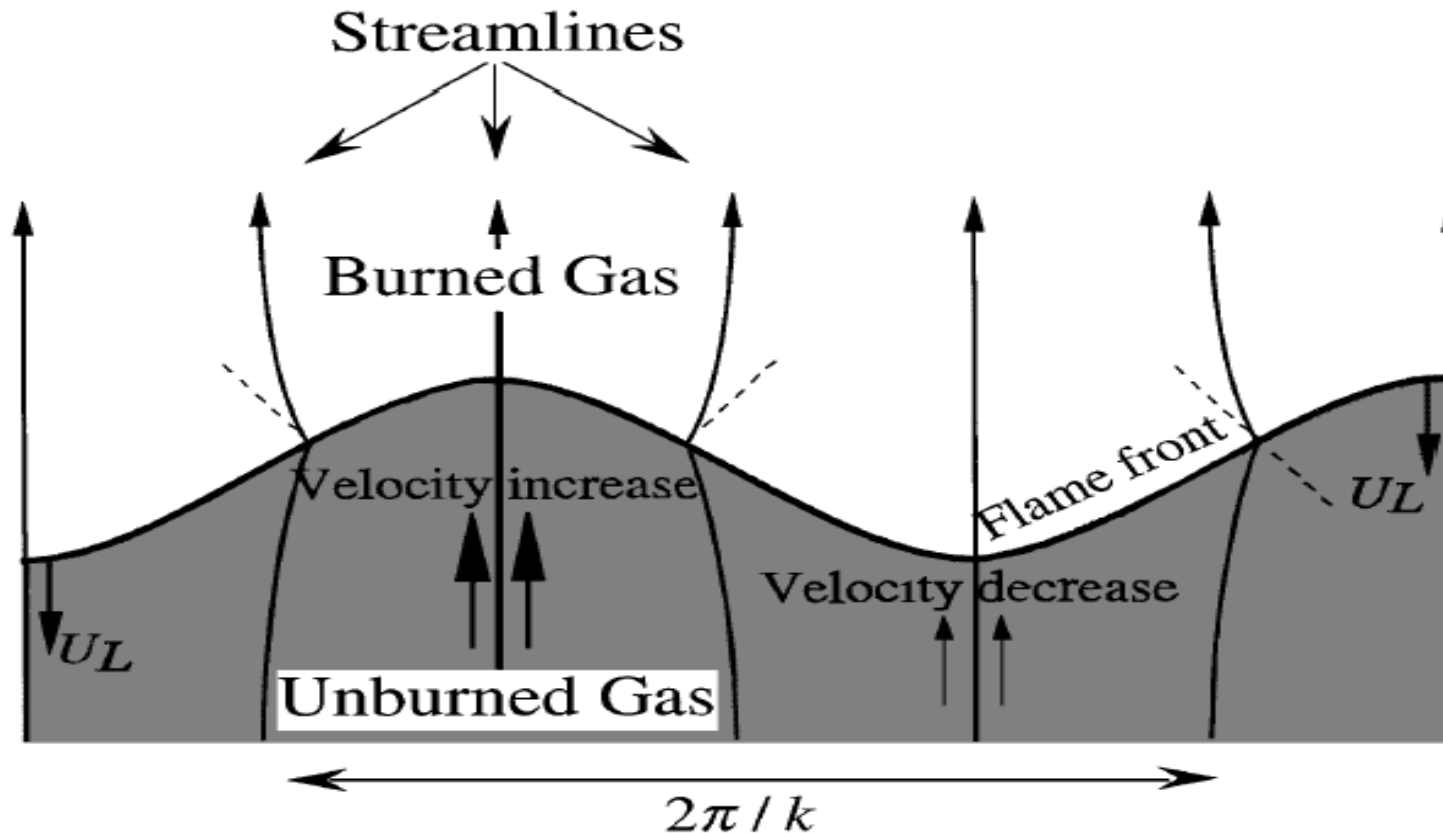


Схема положительной обратной связи

Clanet 1998

Увеличение выпуклости пламени увеличивает скорость пламени, что, в свою очередь, увеличивает выпуклость пламя. **Отклонение** линий течения, приводящих к неустойчивости Дарье-Ландау.

# Скорость роста Д-Л возмущения с волновым числом $k$

$$\sigma_{DL}(k) = \Gamma(\Theta) S_L k \left(1 - \frac{k}{k_{DL}}\right)$$

$$\Gamma(\Theta) = \frac{\Theta}{\Theta + 1} \left[ \left(\Theta + 1 - \frac{1}{\Theta}\right)^{1/2} - 1 \right]$$

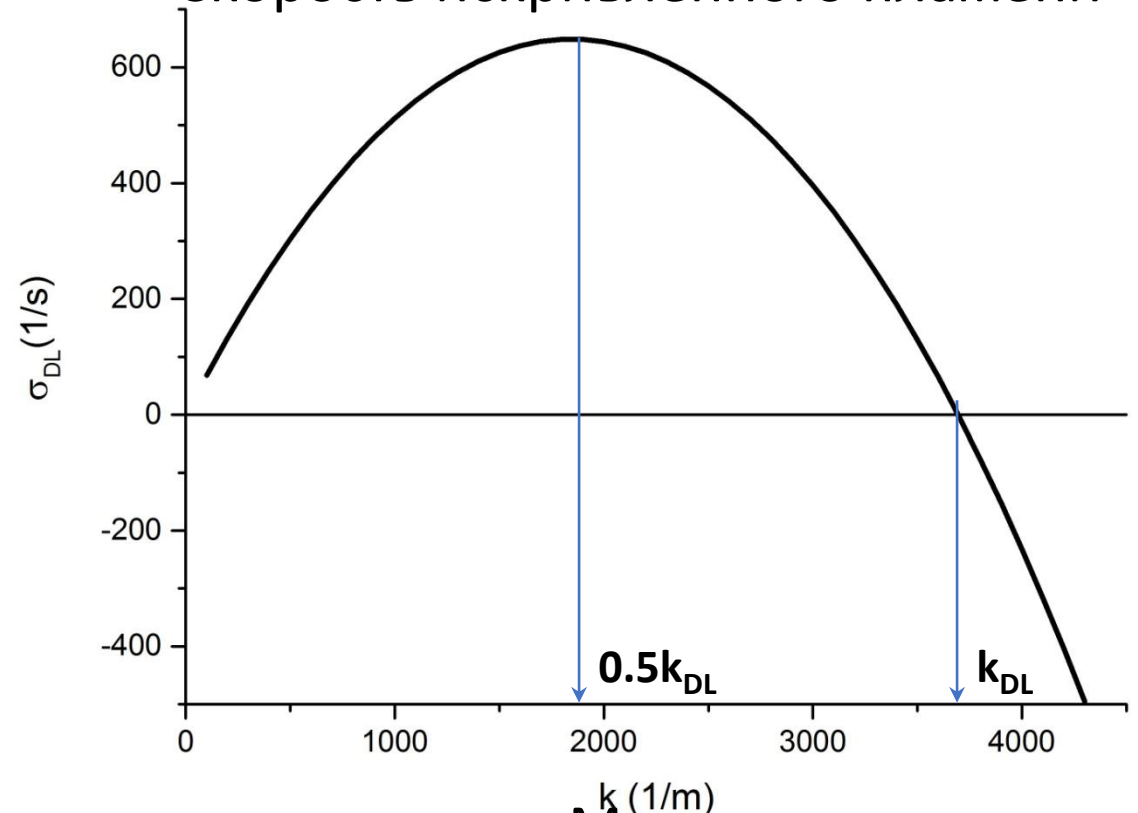
$$k_{DL} = L_f^{-1} \left( 1 + \frac{(\Theta + 1)}{(\Theta - 1)^2} \Theta \ln \Theta \right)^{-1}$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{k}$$

$$\lambda(t) = \lambda_0 \exp(\sigma t) \quad \text{Akkerman 2011}$$

$$U_{DL} = S_L^n \left( \frac{\Theta}{n} k_{DL} \right)^{n-1} t^{n-1}$$

Скорость искривленного пламени



Возмущения с волновым числом выше критического затухают. Максимальная скорость роста у возмущений с волновым числом равным половине критического.

# Результаты экспериментальных исследований ускорения газового пламени смеси водород-воздух

Bradley et al., 2001;  
Breitung et al., 2005;  
Dorofeev et al., 1996;  
Gostintsev et al., 1988, 2008;  
Groethe et al., 2007;  
Mogi et al., 2013;  
Petukhov et al., 2016;  
Konnov et al., 2015;  
Golub et al., 2017,2018

# Модели ускорения пламени

## Аналитические модели

- Фрактальный подход (*Гостинцев, Gouldin, Mogi, Фурсенко, Иванов*)
- Энергетические оценки (*МЧС*)
- Анализ отдельных неустойчивостей (*Ландау, Markstein, Истратов, Clavin, Сивашинский, Каган, Matalon*)
- Взаимодействие фронта пламени с турбулентностью потока (*Щелкин, Karlovitz, Липатников, Сабельников*)
- Статистический турбулентный подход Колмогорова-Обухова (*Гостинцев, Голуб*)

## Численные методы

- Метод отслеживания фронта пламени (*Фурсенко*)
- Усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, RANS (*Левин, Peters, Mastorakos*)
- Метод крупных вихрей LES (*Мольков, Pitsch*)
- Прямое численное моделирование DNS (*Левин,*)
- 
- 
-

# Аппроксимация ускорения пламени степенными функциями вида: $R=At^n$

*Гостинцев Ю.А.-1988:*

все траектории фронта горения с хорошей точностью приближаются степенной функцией с показателем 1.5.

*Kim et al., 2013*

показатель степени постоянно менялся:

от 1.04 и 1.16 на начальном этапе распространения горения до 1.39 и 1.4 на конечном этапе соответственно

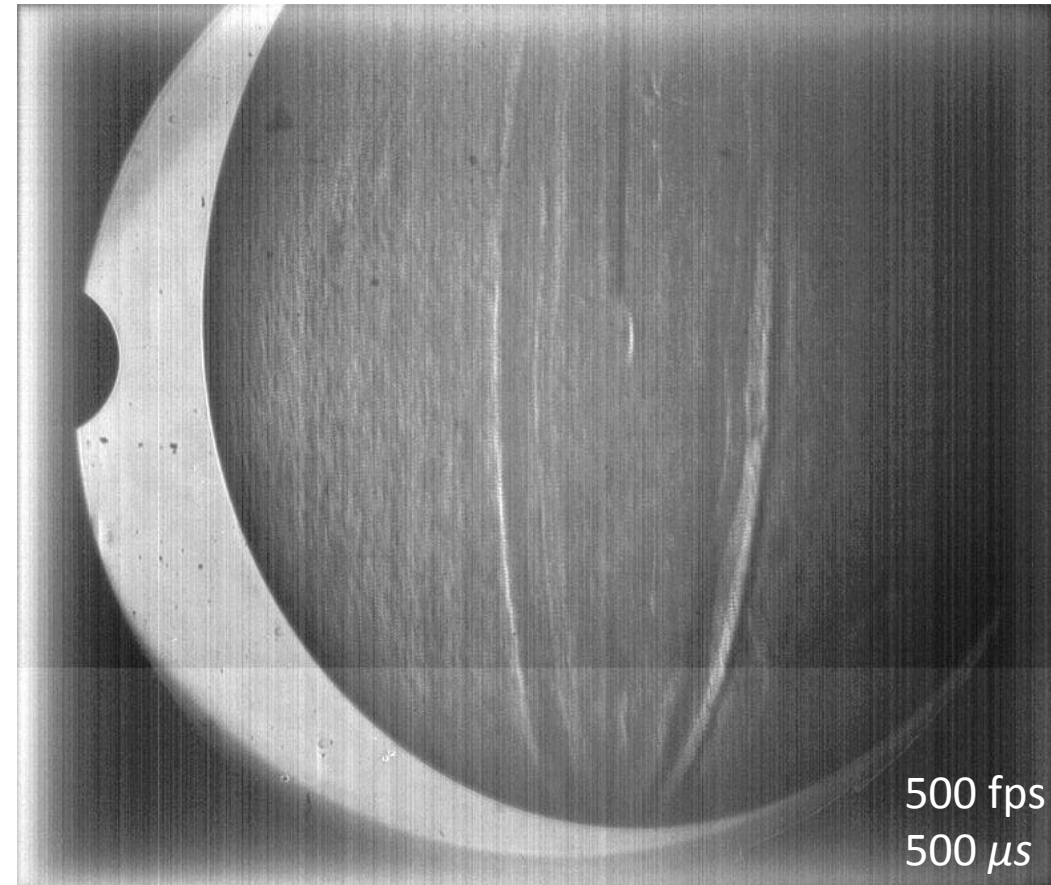
# Заключение 1

Сферическое распространение пламени - это многоступенчатый процесс, который нельзя описать единой универсальной теорией.



# Мотивация

- Недостаток крупномасштабных экспериментов по ускорению бедных водородно-воздушных пламен
- Важность знания скорости распространения пламени для оценки рисков разрушений, вызванных газовыми взрывами.
- Необходимость снижения скорости пламени и взрывных нагрузок



# Структура и динамика фронта пламени

# Описание ускорения пламени степенными функциями

## Фрактальная структура фронта пламени

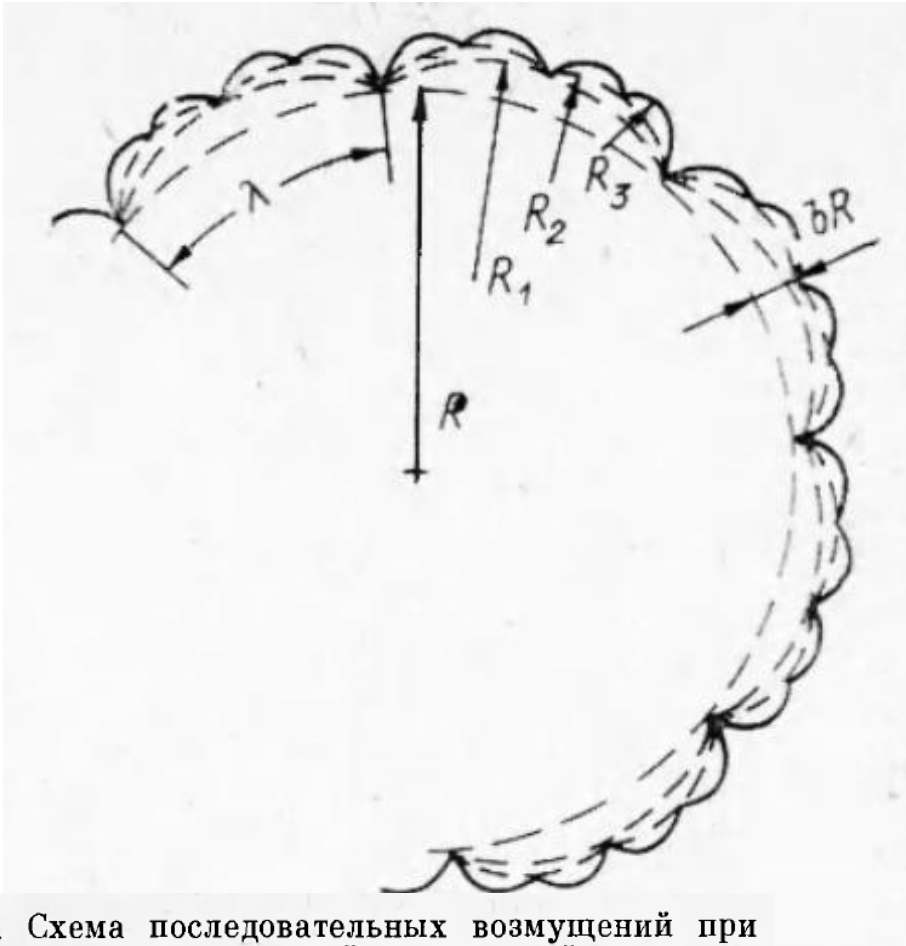
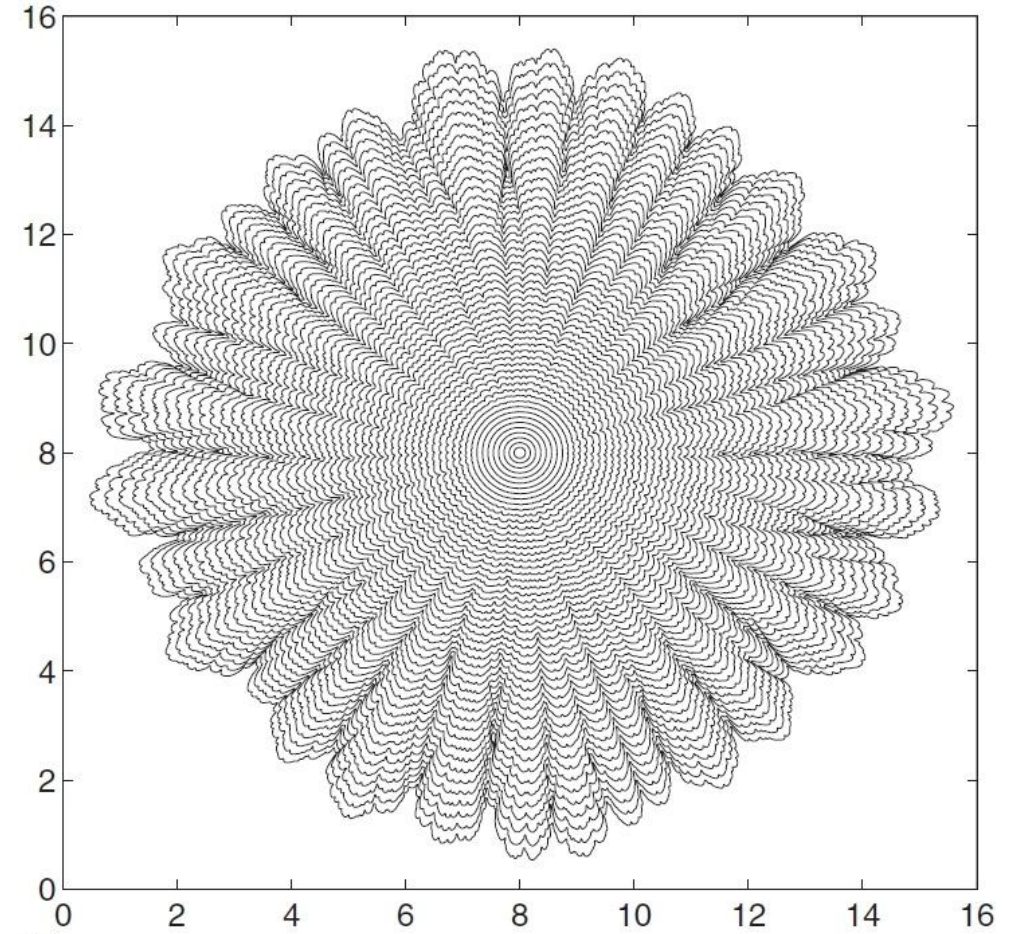


Рис. 3. Схема последовательных возмущений при развитии неустойчивости сферического фронта пламени.

$R$  — радиус невозмущенного фронта;  $R_1, R_2, R_3$  — радиусы кривизны для возмущений первого, второго и третьего порядков;  $bR$  — амплитуда возмущений первого порядка;  $\lambda$  — длина волны.

Гостинцев, 1988

исследования динамики ансамбля неоднородностей не проводились.

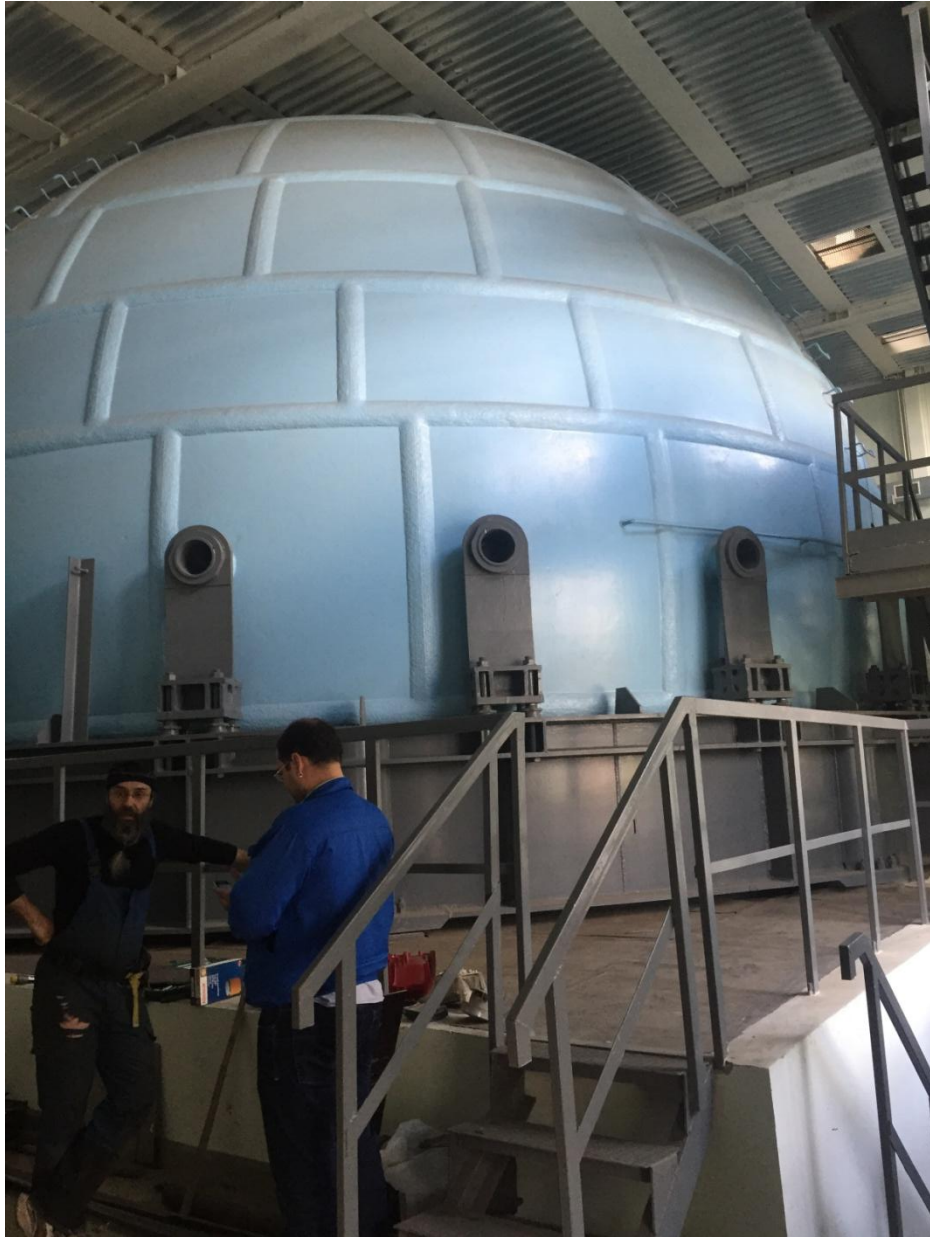


Последовательные положения фронта пламени, демонстрирующие его фрактальное развитие.

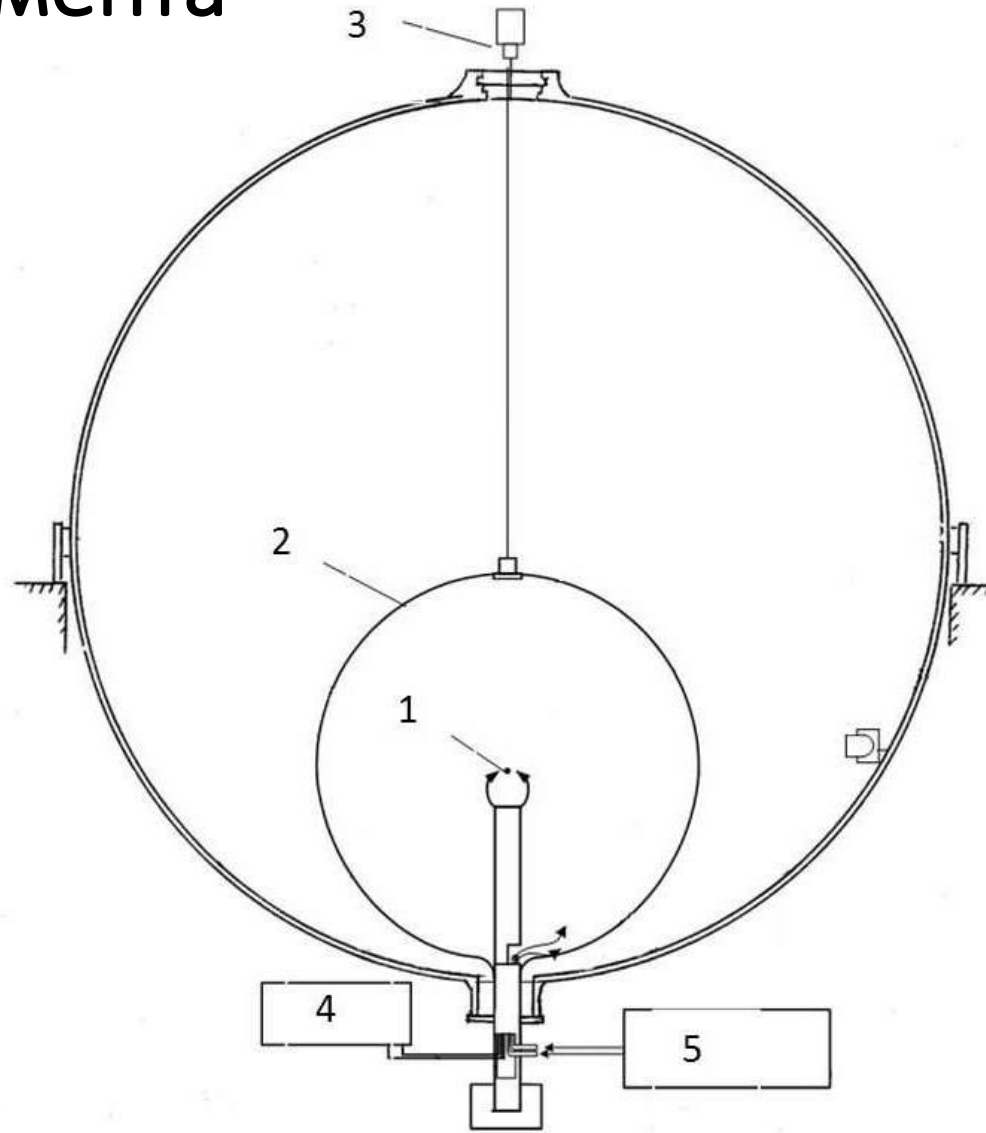
Fursenko, 2008



# Взрывная камера «Сфера»



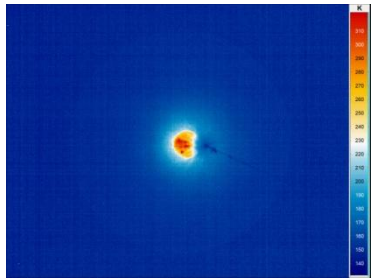
# Схема эксперимента



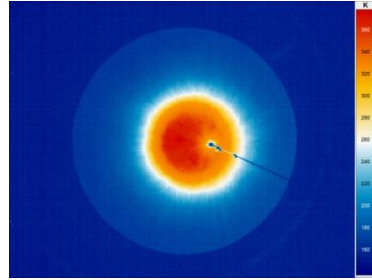
1-точка воспламенения; 2-оболочка с горючей смесью;  
3-Камера InfraTek 8320; 4-блок инициирования; 5-система наполнения.



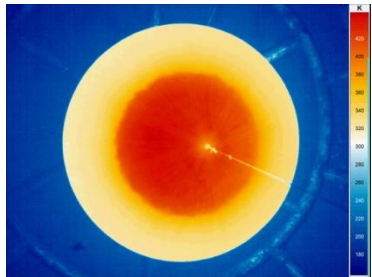
# ИК-изображения распространения пламени водородно-воздушной смеси



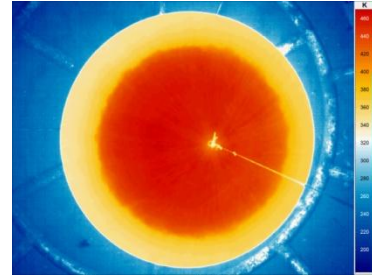
$t = 82,5\text{мс}$



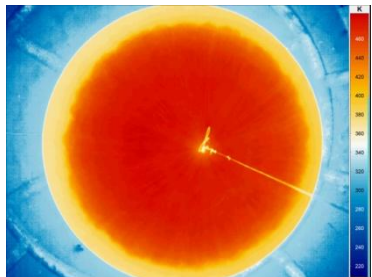
$t = 165\text{мс}$



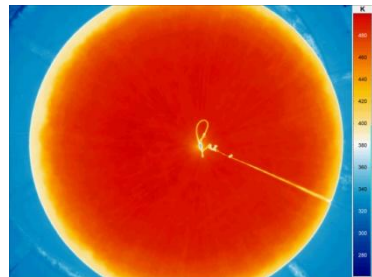
$t = 247,5\text{мс}$



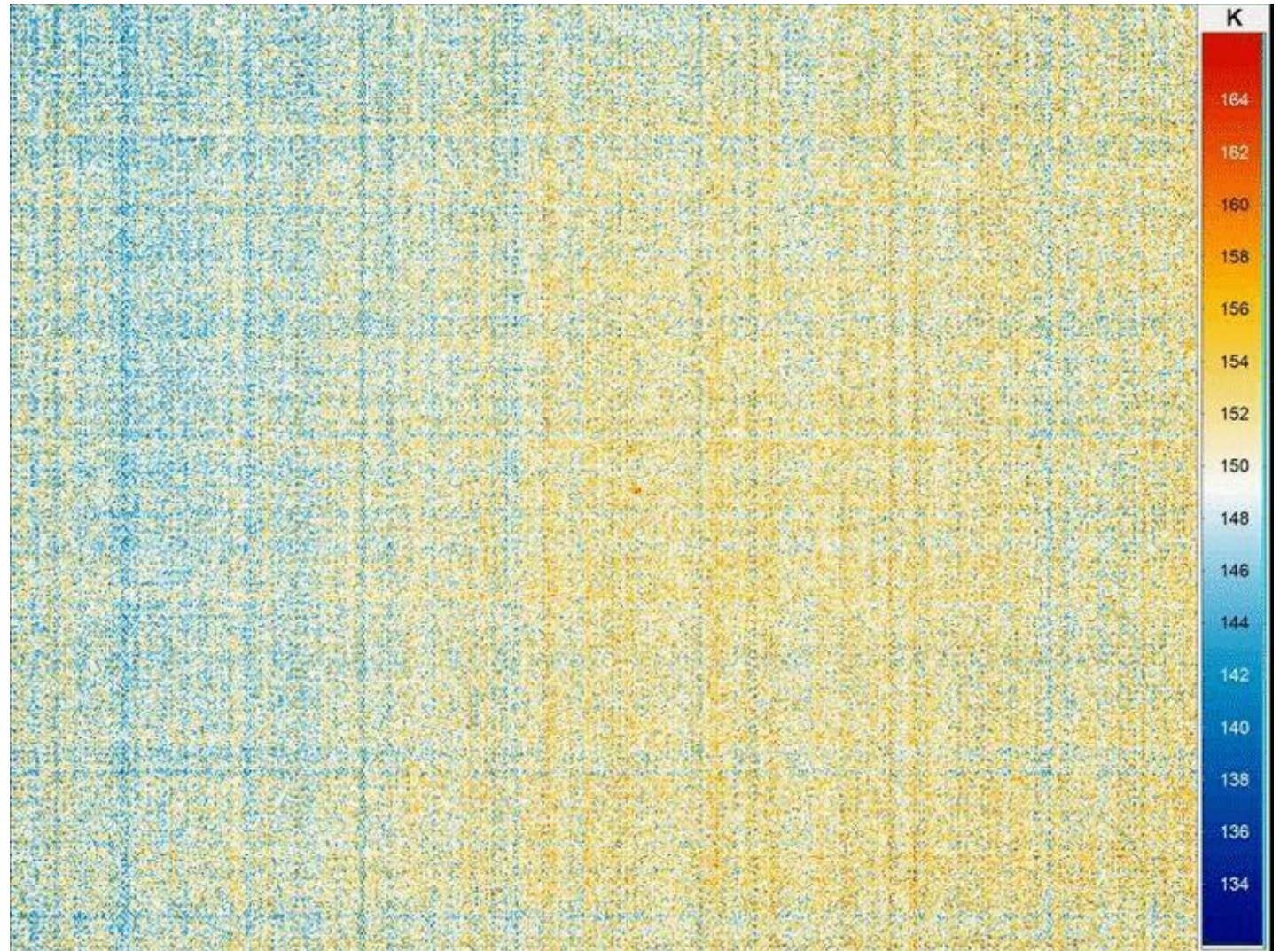
$t = 330\text{мс}$



$t = 412,5\text{мс}$



$t = 495\text{мс}$



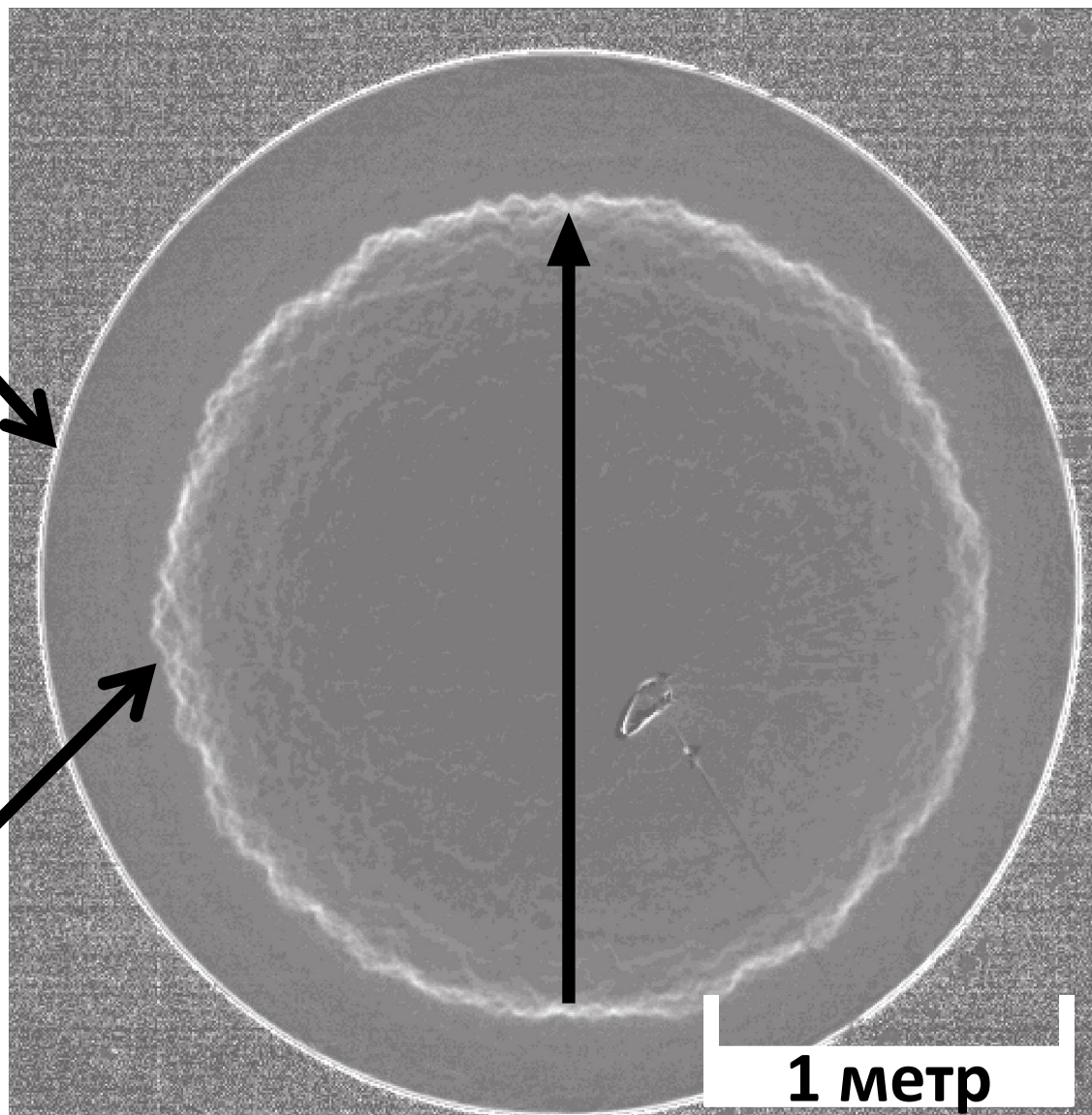
Содержание водорода 15%. Сфера  $R = 1,5\text{ м}$ . Средний ИК-диапазон с частотой 300 кадров в секунду.



# Программа обработки изображений сферического фронта пламени

**Сферическая оболочка**

**Фронт пламени**



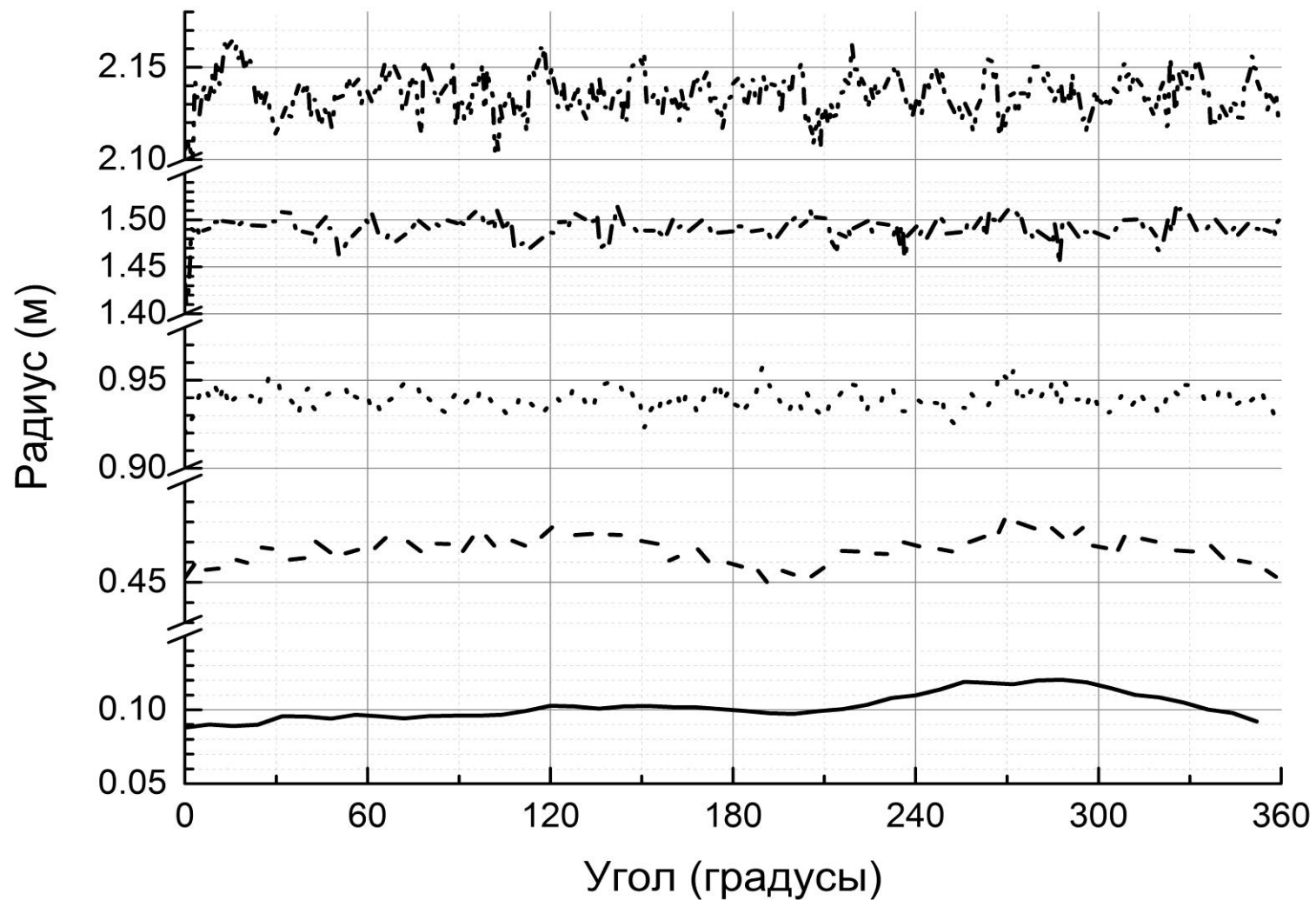
$$V_0 = 8,6\text{m}^3$$

**15% H<sub>2</sub>**

$$t = 0,5\text{c}$$

**1 метр**

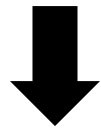
# Угловые развертки радиуса фронта пламени



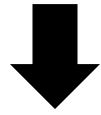
моменты времени 133, 266, 399, 532 и 665 мс от инициирования горения

# Определение характерных размеров неоднородностей

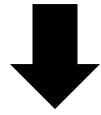
Зависимость радиуса от угла



Быстрое преобразование Фурье

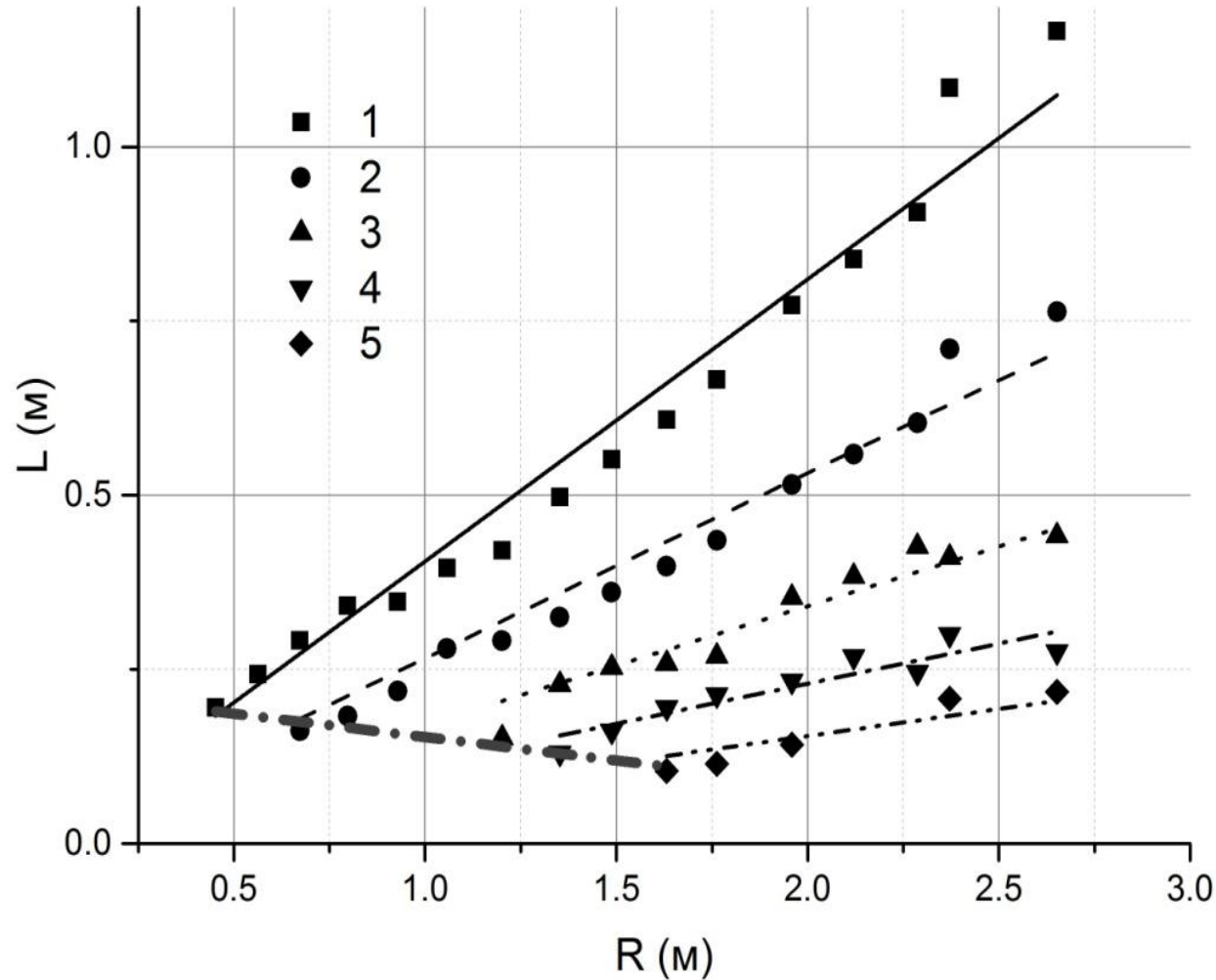


Умножение на радиус фронта



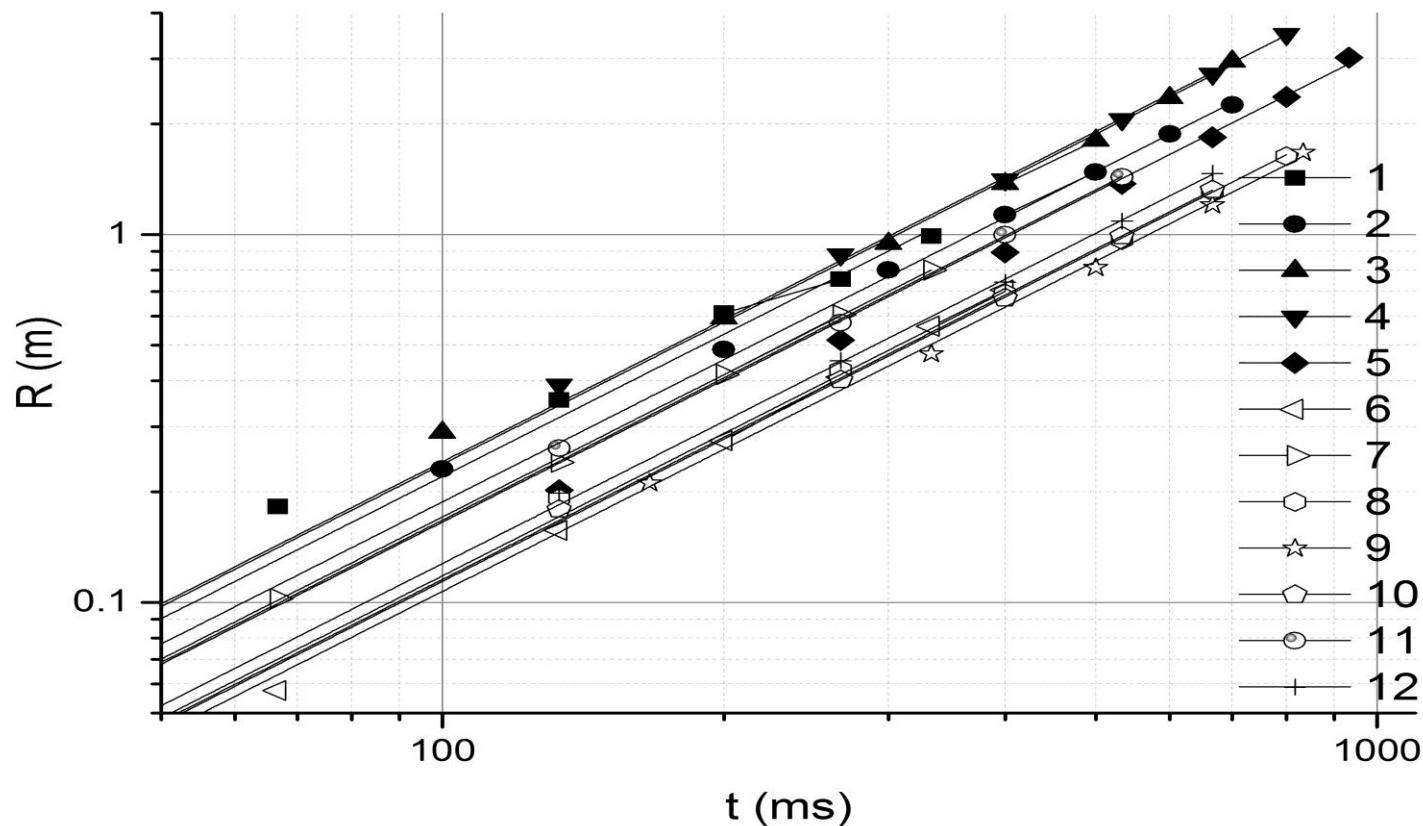
Длина волны неоднородности

# Развитие каскада неоднородностей фронта пламени с увеличением радиуса



С увеличением радиуса пламени образуются новые неоднородности меньших угловых размеров: 1,2,3,4,5- порядок возмущения. Длина волны каждого последующего каскада в 1.5 раза меньше, чем предыдущего.

# Влияние энергии инициирования на скорость пламени



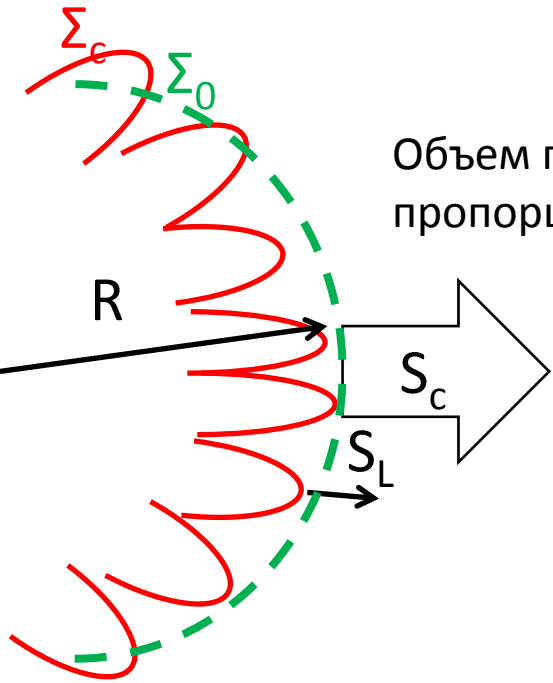
Заполненные значки: энергия инициирования 5 Дж (1, 2 – 15 м<sup>3</sup>, 3-5 – 30 м<sup>3</sup>), пустые – 1 мДж (6-12 – 9 м<sup>3</sup>).

Ускорение по степенному закону  $R=At^n$ .  $\langle n \rangle = 1.3$

При увеличении энергии инициирования на 3 порядка значение предэкспоненциального множителя ускорения пламени увеличивается в 1.6 раза.

Фрактальная размерность поверхности  $D=2.23$

# Ускорение пламени и его фрактальная структура

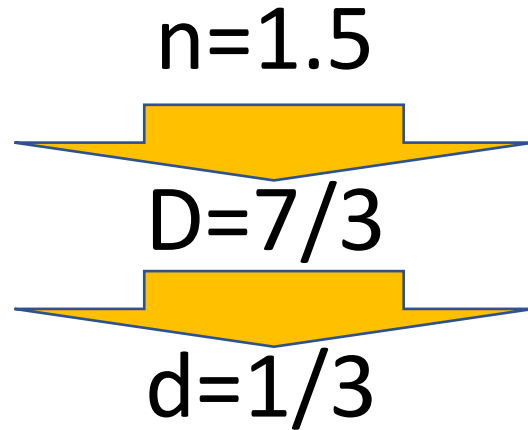


$$\Sigma_c \sim R^{2\frac{1}{3}}$$

$$\Sigma_0 \sim R^2$$

$$R \cong At^{1.3}$$

$$D = \frac{3n - 1}{n} = 2.23$$



$$\frac{d}{dt} \left( \frac{4}{3} \pi R^3 \right) = \Sigma_c S_L$$



$$\Sigma_c = \frac{6\pi A^3 t^{3.5}}{S_L}$$



$$\Sigma_c = \frac{6\pi A^{\frac{2}{3}} R^{\frac{7}{3}}}{S_L}$$

$$R \cong At^{1.5}$$

Гостинцев (1988)

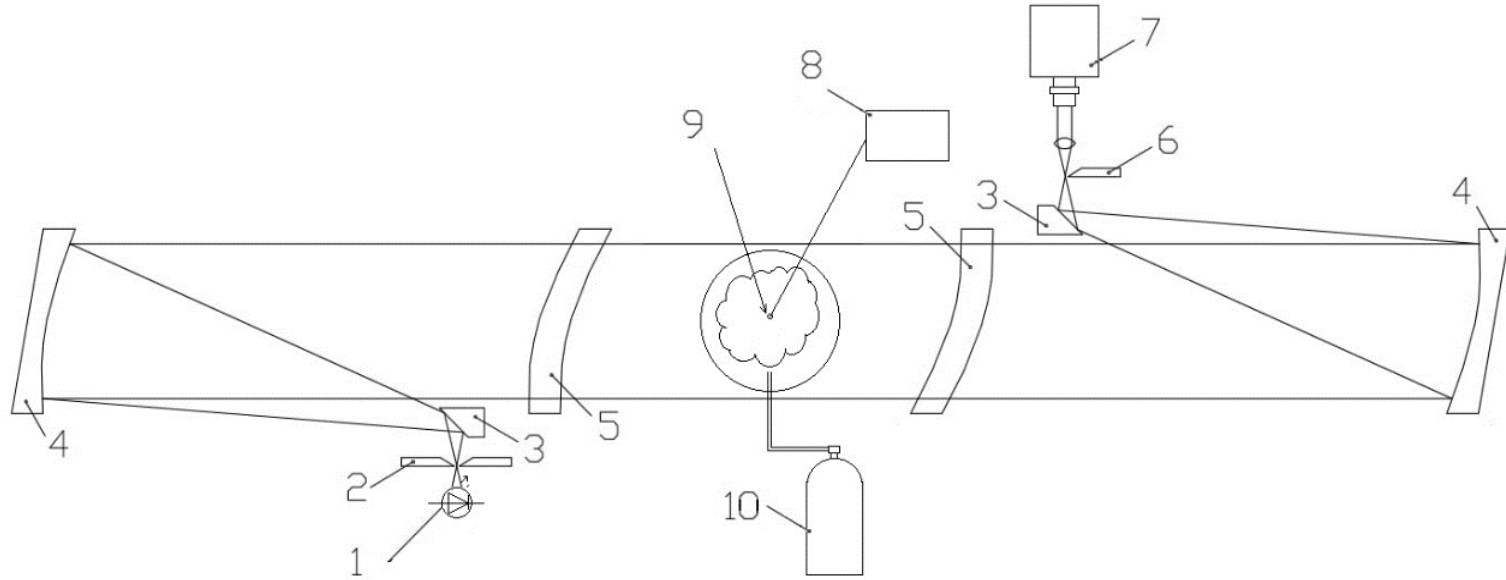
**1/3 – избыток размерности**

**0.23 – избыток размерности**

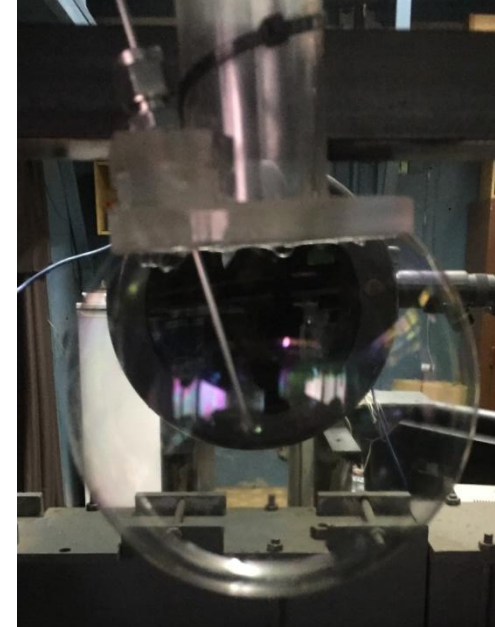
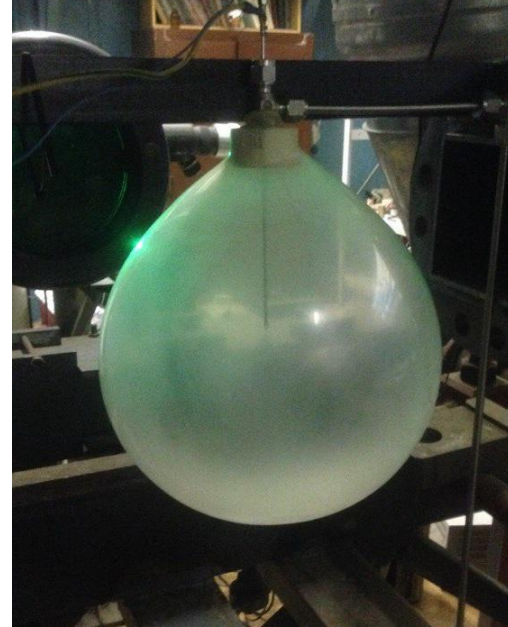
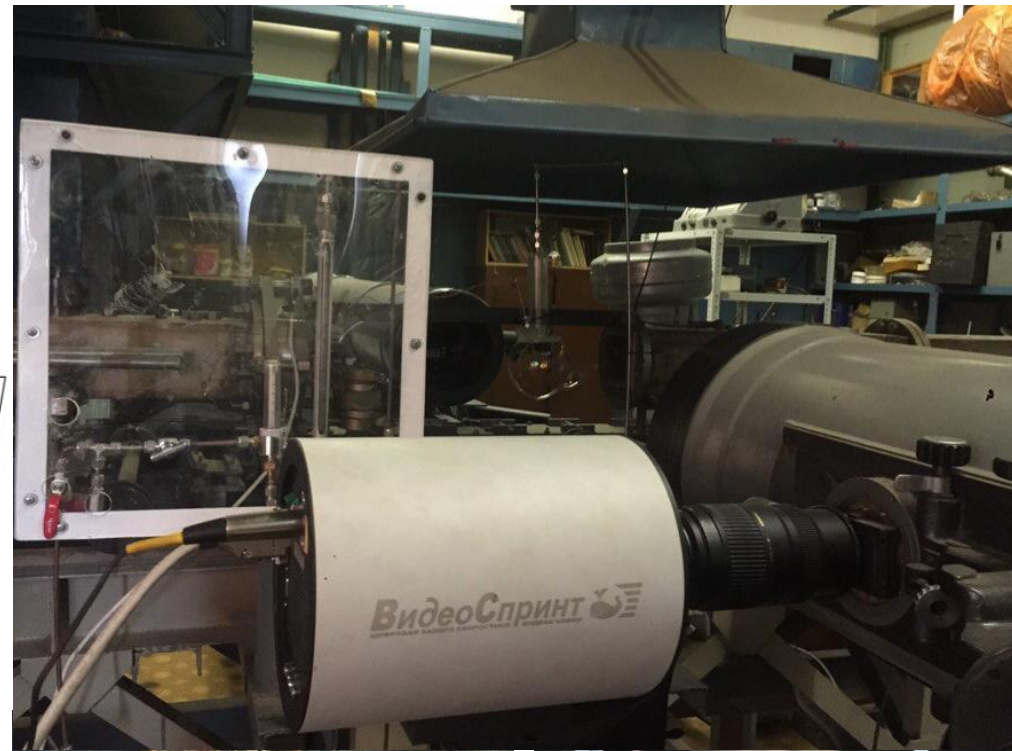


# Разброс экспериментальных данных по развитию газовых взрывов

# Стендовая установка



1. Светодиодный источник света
2. Щель
3. Диагональное зеркало
4. Сферическое зеркало
5. Мениск
6. Нож Фуко
7. Высокоскоростная камера
8. Воспламенитель
9. Точка воспламенения
10. Система наполнения

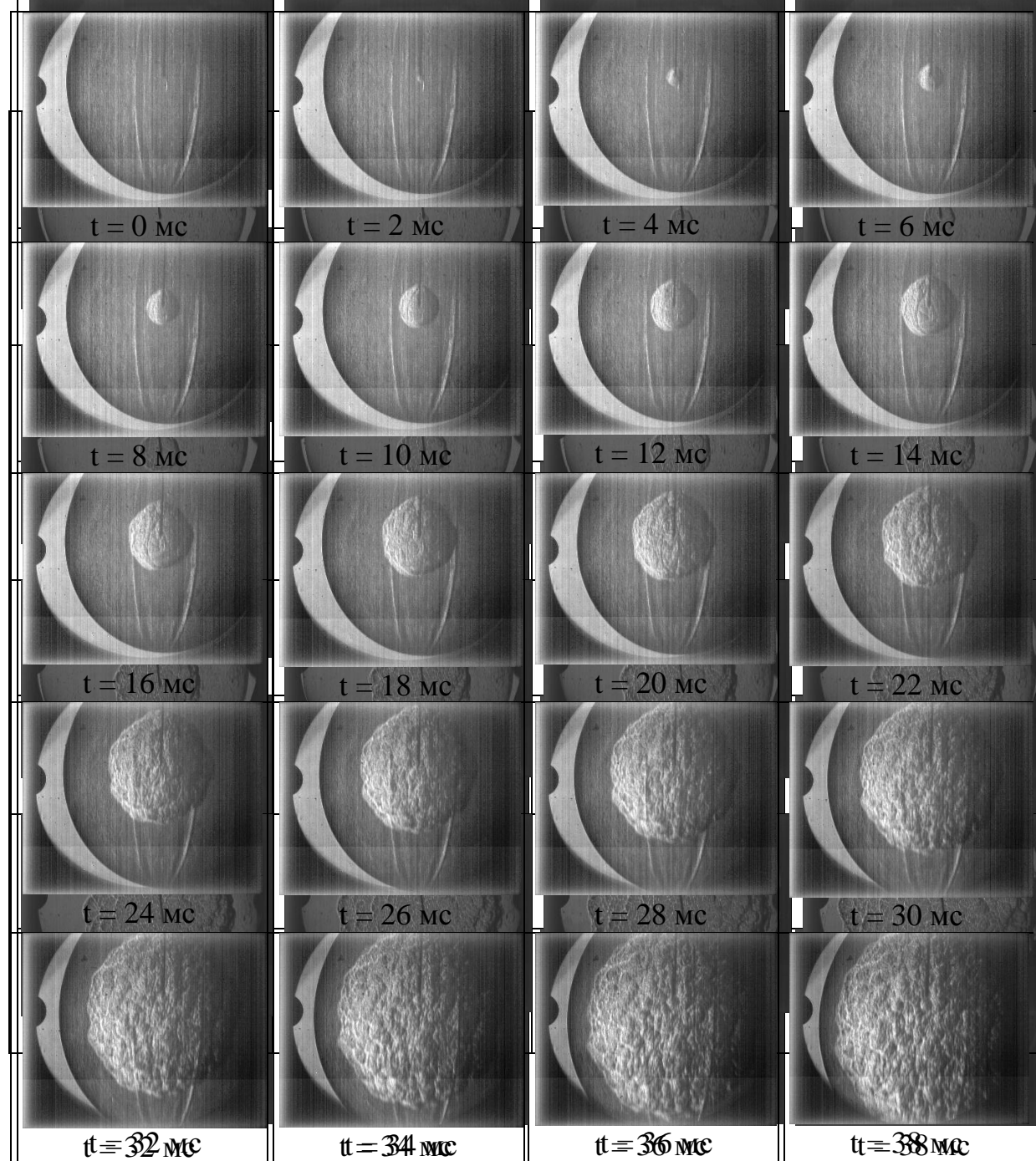


# Шлирен-кинограммы развития фронта пламени

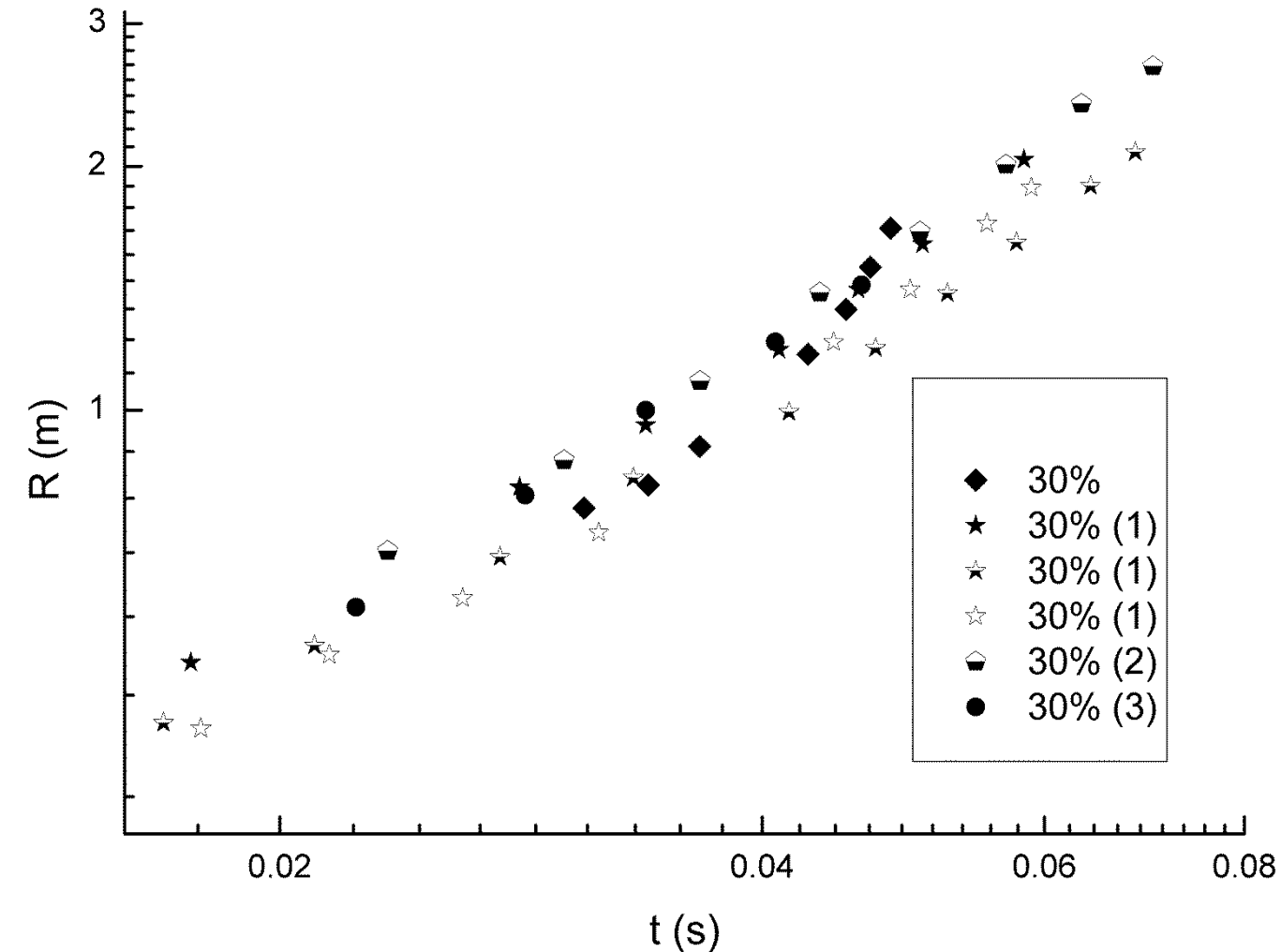
17% H<sub>2</sub>  
500 к.с  
Мыльная оболочка

15% H<sub>2</sub>  
500 к.с  
Мыльная оболочка

15% H<sub>2</sub>  
500 к.с  
Латексная оболочка



# Сравнение распространения пламени с литературными данными в богатых водородно-воздушных смесях



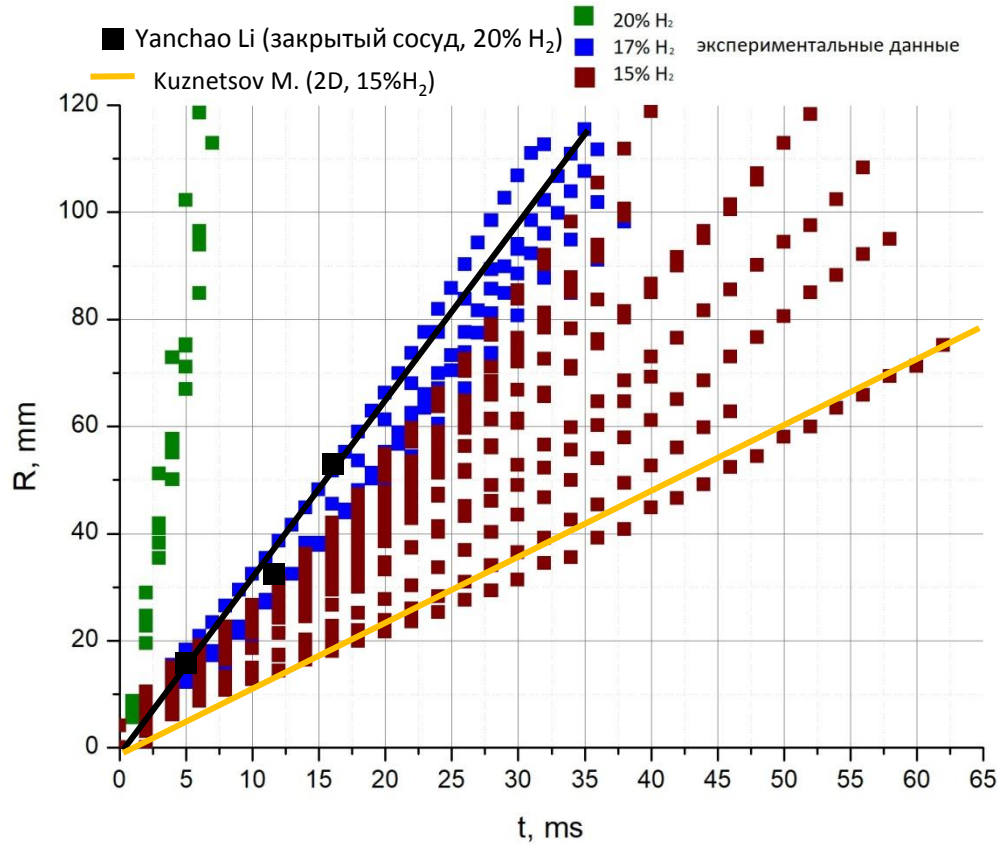
**(1) – Gostintsev Y.A.,  
Istratov A.G., Shulenin Y.V.  
(1988)**

**(2) – stand «Sphere»,  
Petukhov et al (2016)**

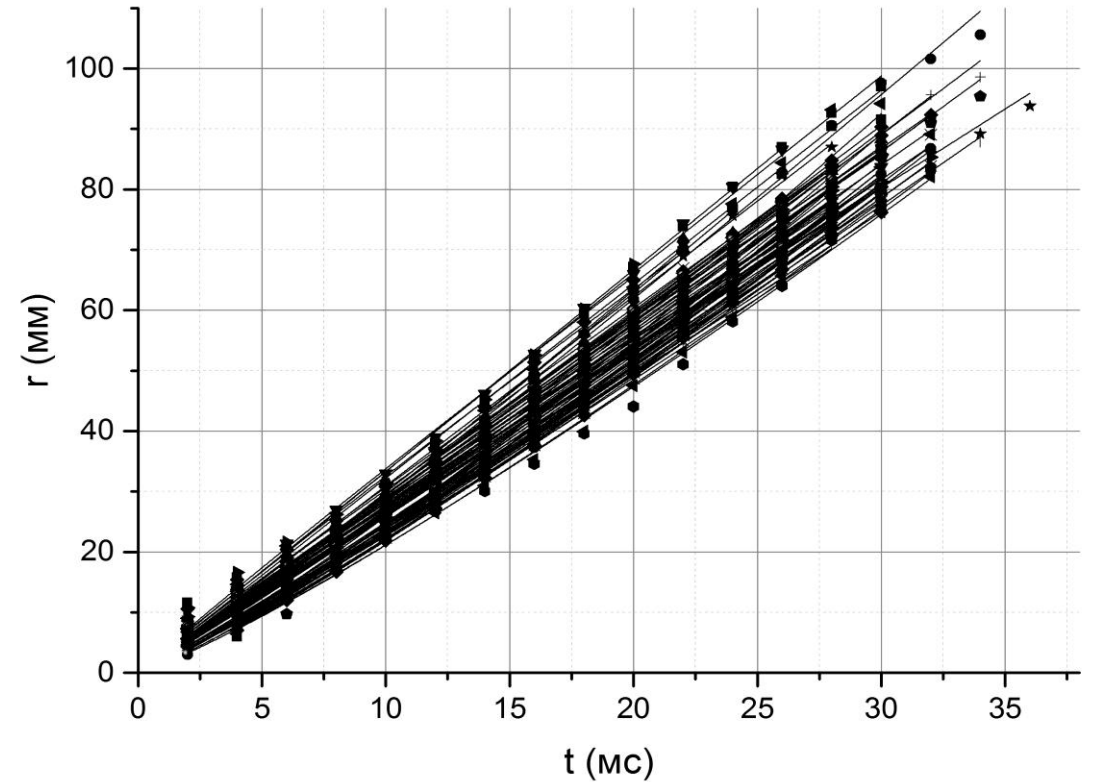
**(3) – Molkov V.V., Makarov  
D.V., Schneider H. (2007)**

**◆ Голуб В.В., 2017**

# Влияние концентраций водорода на развитие неустойчивостей и динамику фронта пламени



R-t-диаграммы фронта пламени для смесей с 15%, 17% и 20% содержанием водорода, мыльная оболочка



R-t-диаграммы фронта пламени для смеси с 15% содержанием водорода, 80 экспериментов, латексная оболочка. Погрешность не превышает размер точки.

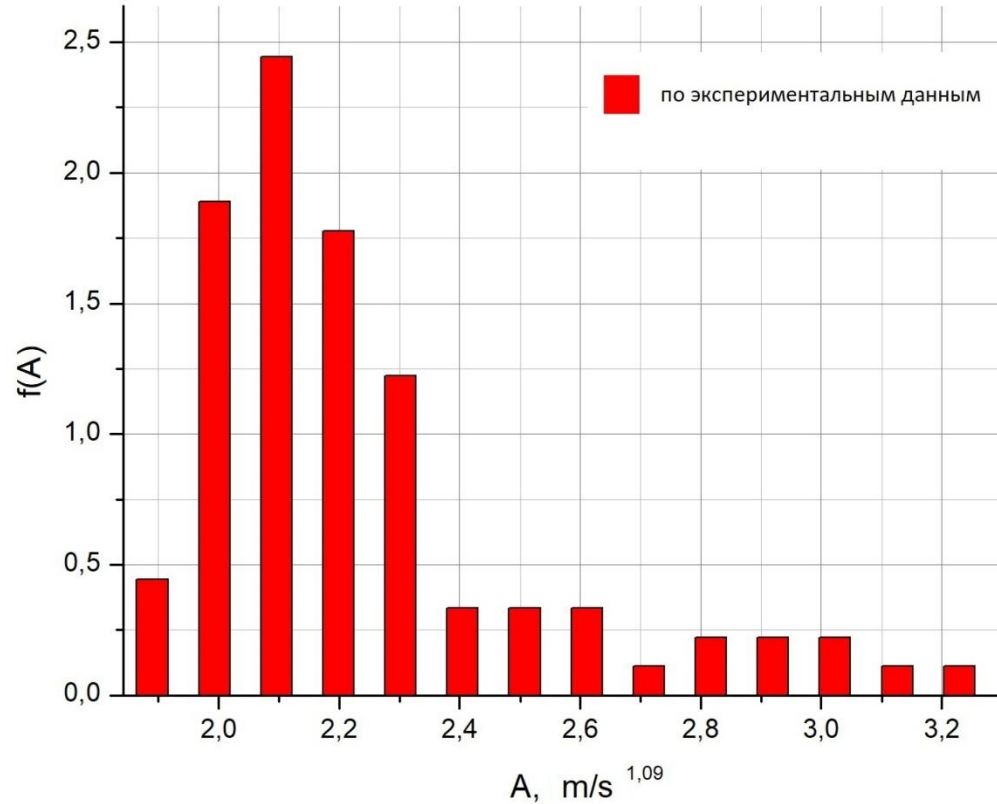


# Аппроксимация степенным законом

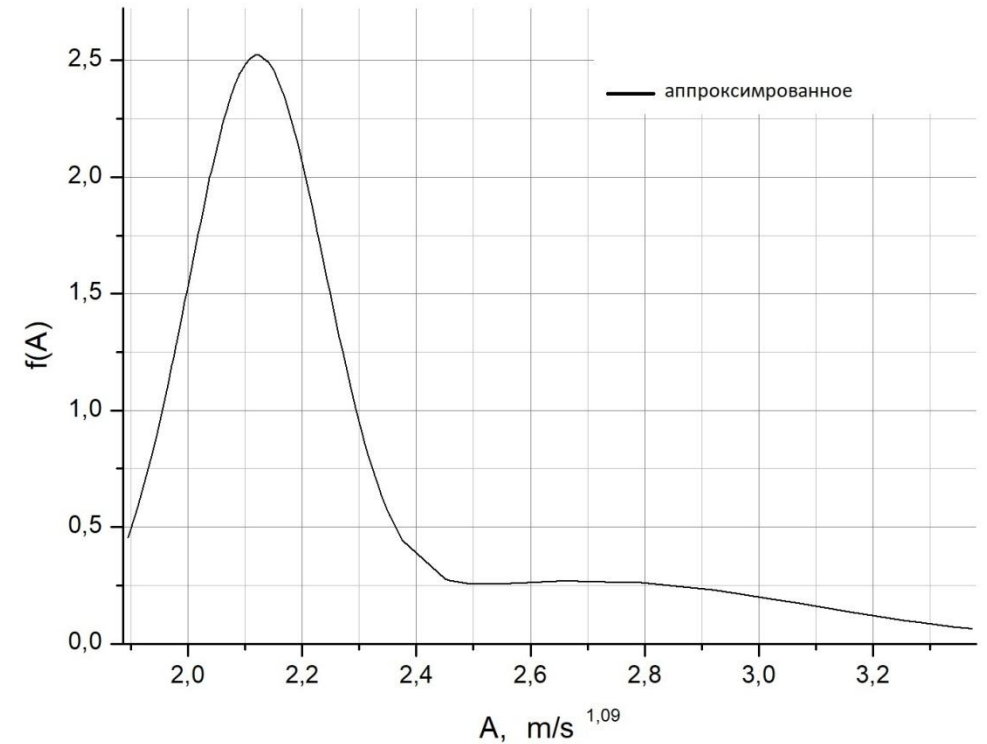
$$R = A_i t^{n_i} \quad \longrightarrow \quad \langle n \rangle = 1,09 \quad \longrightarrow \quad R = A_j t^{1,09}$$

i	A <sub>i</sub>	n <sub>i</sub>	A (n = 1,09)	i	A <sub>i</sub>	n <sub>i</sub>	A (n = 1,09)	i	A <sub>i</sub>	n <sub>i</sub>	A (n = 1,09)	i	A <sub>i</sub>	n <sub>i</sub>	A (n = 1,09)
1	3,42	0,99	2,70	21	2,41	1,06	2,39	41	2,50	1,02	2,19	61	2,38	1,04	2,21
2	2,48	1,07	2,56	22	1,42	1,17	2,01	42	2,03	1,08	2,12	62	2,82	0,99	2,26
3	2,46	1,08	2,60	23	2,84	1,01	2,37	43	2,47	1,03	2,22	63	2,88	0,99	2,29
4	3,31	1,00	2,75	24	2,73	1,01	2,35	44	1,72	1,13	2,12	64	1,53	1,17	2,16
5	3,54	0,96	2,67	25	1,82	1,13	2,24	45	1,65	1,17	2,32	65	1,89	1,10	2,07
6	3,24	1,00	2,63	26	1,55	1,16	2,07	46	2,64	1,02	2,29	66	1,79	1,16	2,41
7	3,71	0,96	2,79	27	1,56	1,17	2,16	47	2,09	1,06	2,09	67	2,35	1,04	2,18
8	1,46	1,16	1,99	28	2,22	1,07	2,24	48	1,93	1,08	2,03	68	2,46	1,04	2,27
9	2,89	0,98	2,17	29	2,03	1,09	2,19	49	1,80	1,10	2,00	69	2,46	1,03	2,25
10	2,56	1,03	2,32	30	2,04	1,09	2,19	50	1,63	1,15	2,11	70	1,56	1,15	2,04
11	2,37	1,06	2,31	31	1,92	1,11	2,17	51	1,68	1,14	2,16	71	2,51	1,02	2,17
12	2,68	1,03	2,40	32	1,72	1,15	2,26	52	3,26	0,97	2,48	72	2,59	1,03	2,33
13	3,06	0,98	2,37	33	1,45	1,20	2,22	53	1,85	1,12	2,22	73	2,51	1,03	2,25
14	1,69	1,13	2,08	34	1,42	1,19	2,05	54	2,83	1,02	2,46	74	2,16	1,06	2,13
15	1,73	1,13	2,14	35	2,67	1,00	2,19	55	2,87	1,01	2,45	75	3,25	0,95	2,33
16	1,90	1,09	2,06	36	1,76	1,13	2,16	56	3,34	0,96	2,43	76	2,35	1,04	2,21
17	1,83	1,11	2,09	37	1,83	1,12	2,16	57	2,52	1,07	2,59	77	1,76	1,12	2,09
18	1,65	1,14	2,11	38	2,61	1,02	2,27	58	3,02	1,01	2,56	78	2,10	1,06	2,04
19	2,61	1,04	2,42	39	2,53	1,02	2,21	59	2,84	1,02	2,44	79	2,82	0,98	2,20
20	3,01	0,99	2,35	40	1,48	1,17	2,07	60	2,94	1,00	2,43	80	3,16	0,96	2,29

# Нормальная плотность вероятности предэкспоненциального множителя



Гистограмма предэкспоненциальных множителей



$$f(A) = \frac{0,73}{0,12\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(A-2,17)^2}{0,0288}} + \frac{0,27}{0,4\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(A-2,73)^2}{0,32}}$$

## Заключение 2

Впервые в изначально неподвижной 15% водородно-воздушной смеси экспериментально:

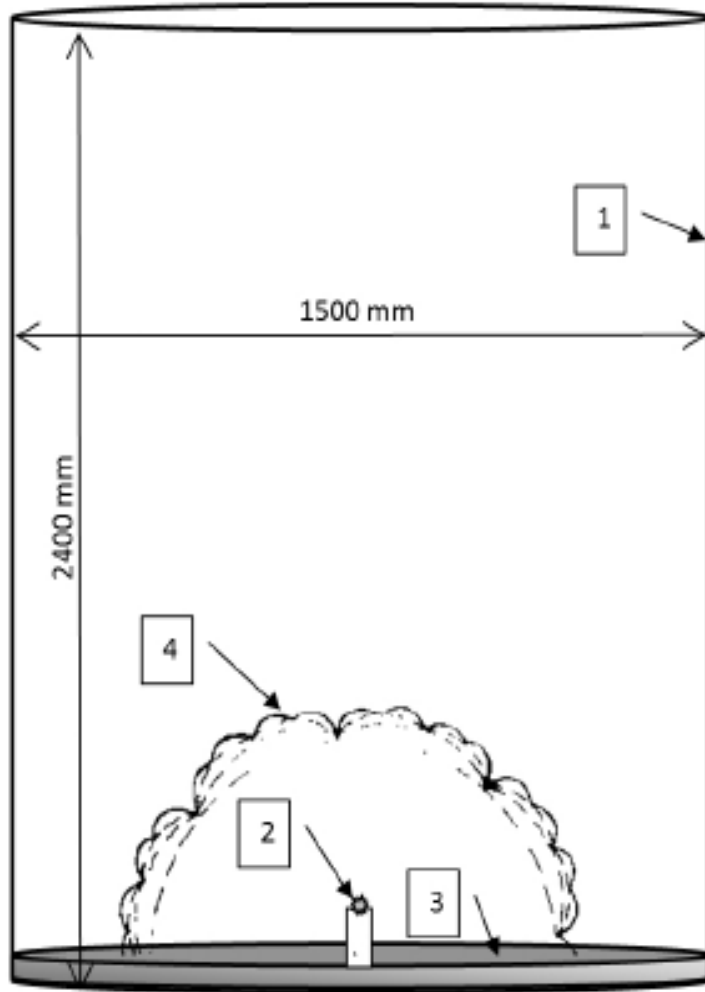
- определены масштабы и динамика развития каскада неоднородностей сферического пламени. Длина волны каждого последующего каскада в 1.5 раза меньше, чем предыдущего;
- получена фрактальная размерность сферического фронта пламени;
- обнаружено, что развитие неоднородностей на фронте пламени при неизменном составе горючей смеси, объеме оболочки и энергии инициирования приводит к различию в скорости фронта пламени  $\pm 17\%$ ;
- показано что при увеличении энергии инициирования на 3 порядка (1 мДж и 5 Дж) значение предэкспоненциального множителя ускорения пламени увеличивается в 1.6 раза.



# Распространение газового пламени с отводом тепла

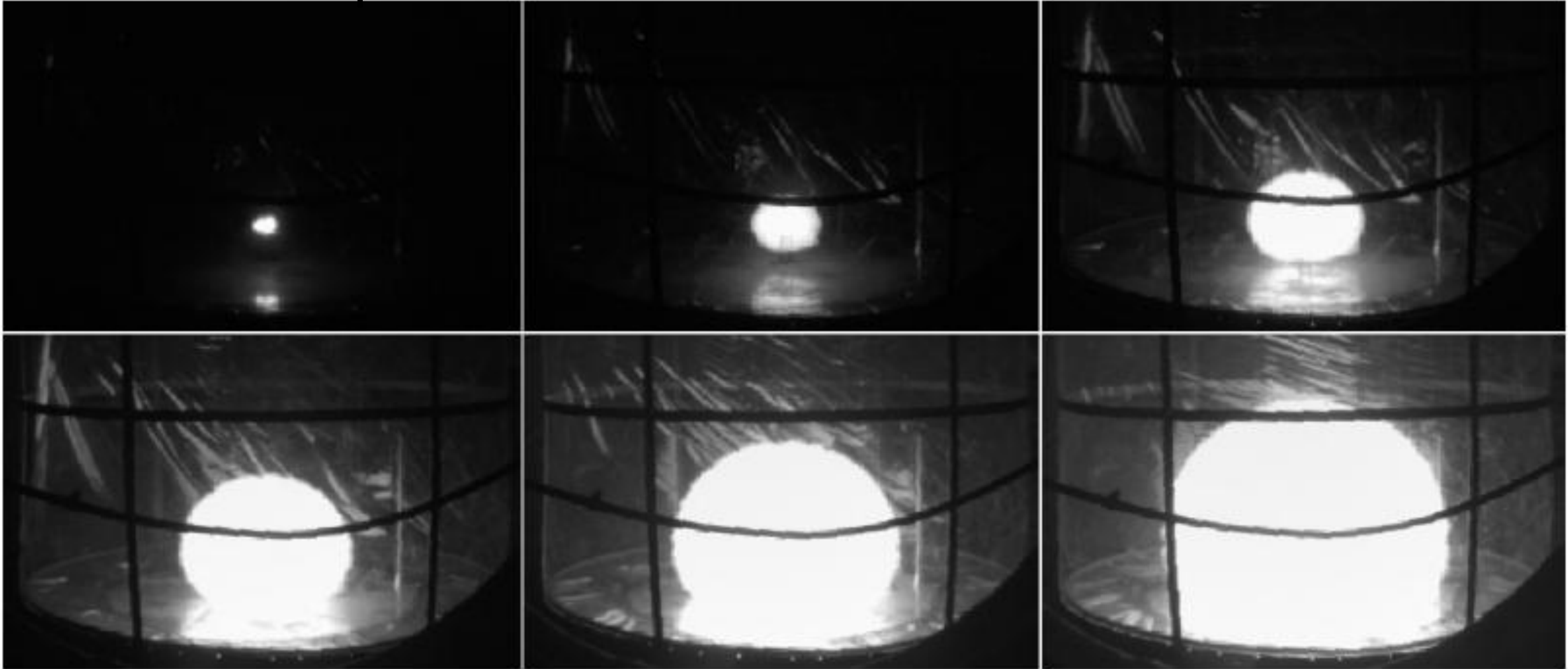
- ИК визуализация ускоряющегося фронта пламени
- Исследование структуры стальной шерсти
- Расчет потерь тепла
- Адаптация аналитической модели ускорения пламени к условиям отвода тепла.

# Экспериментальная установка



1 – ПВД оболочка, 2 – ВП, 3 – стальная шерсть/алюминиевая пластина, 4 – фронт пламени. Водородно-воздушная смесь с 15% водорода при нормальных давлении и температуре. Энергия взрыва проволоочки 5 Дж. Слой стальной шерсти 50 мм.

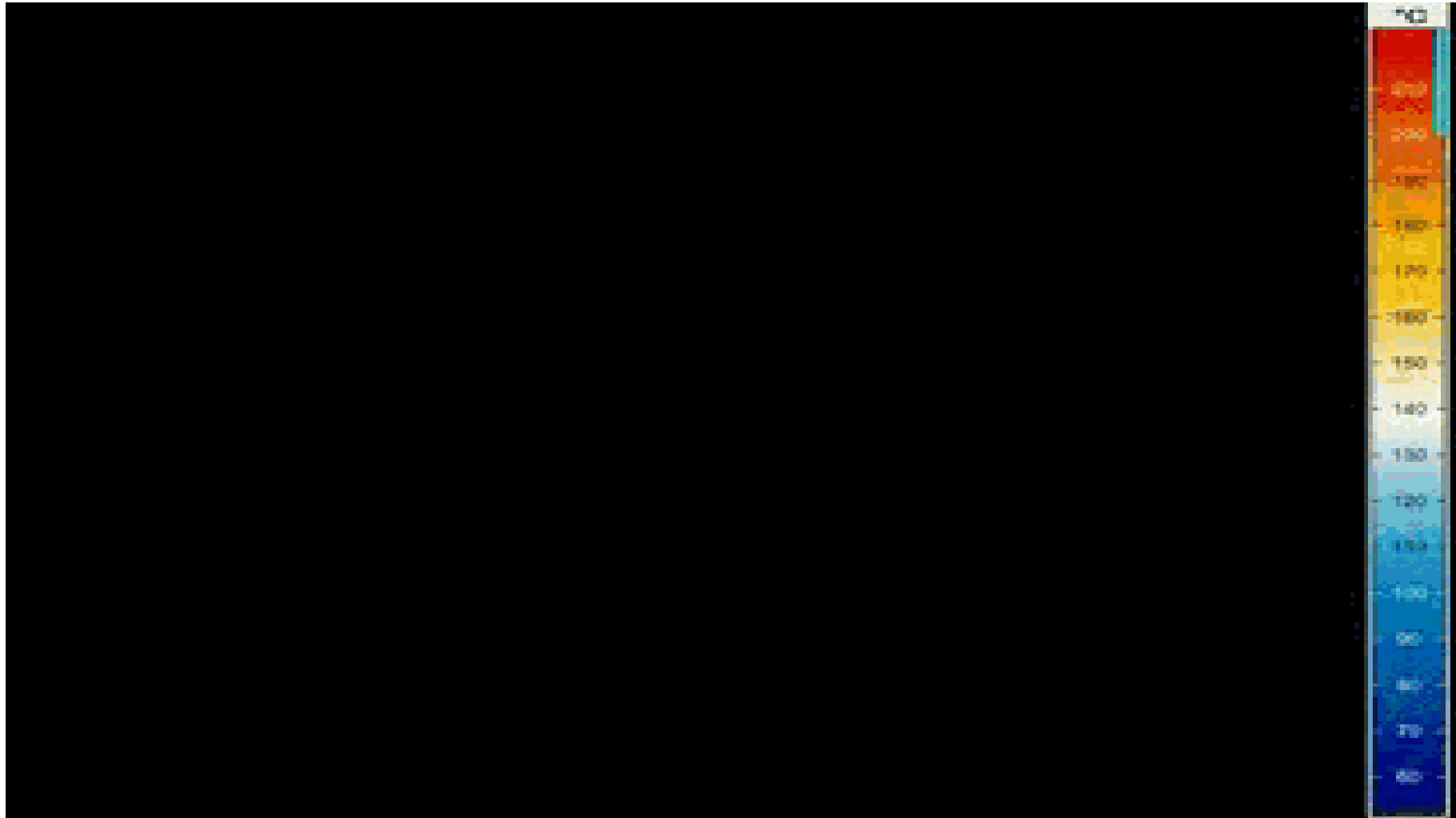
# ИК кадры водородно-воздушного пламени над сплошной плоской поверхностью



Моменты времени 3.33 мс, 16.67, 30, 43.33, 56.67 и 70 мс (слева-направо, сверху-вниз)

ИК камера InfraTec ImageIR 8320. Спектральный диапазон 2-5.7  $\mu\text{m}$

# Распространение пламени в цилиндрическом объеме

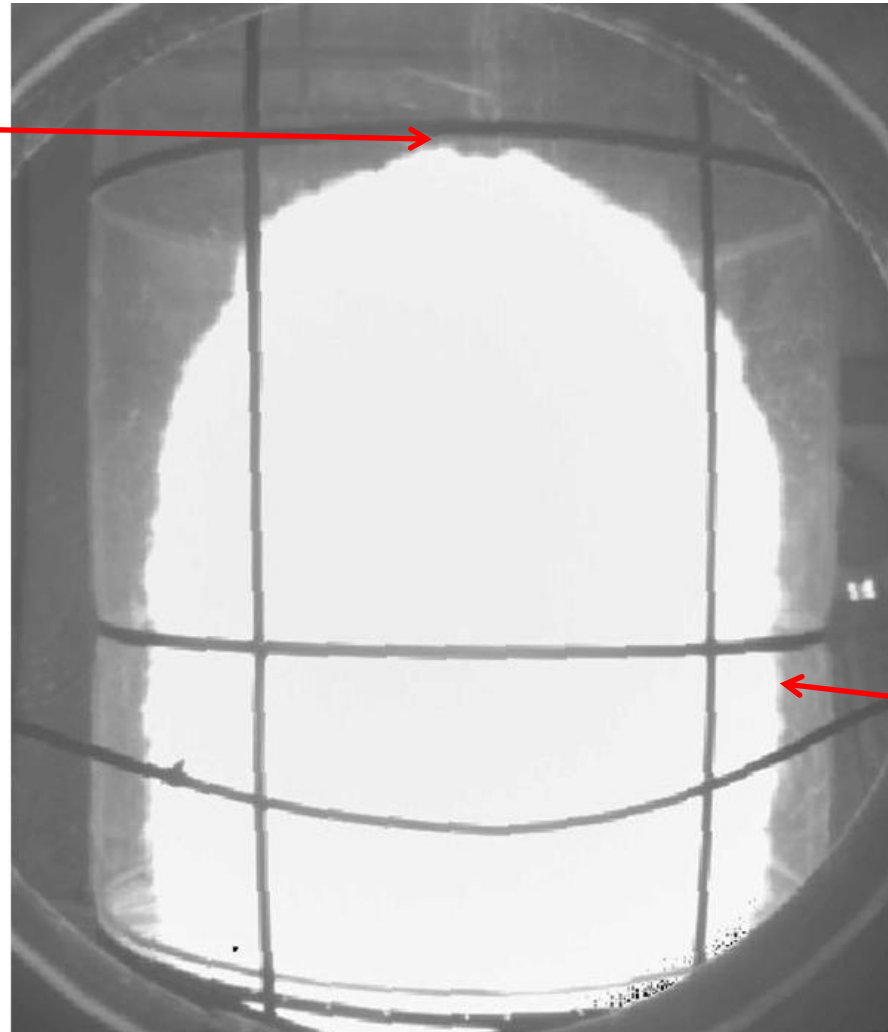


Переход от полусферического к поступательному распространению пламени.

ИК камера InfraTec ImageIR 8320. Спектральный диапазон 2-5.7  $\mu\text{m}$

# Распространение пламени в цилиндрическом объеме

Передний край

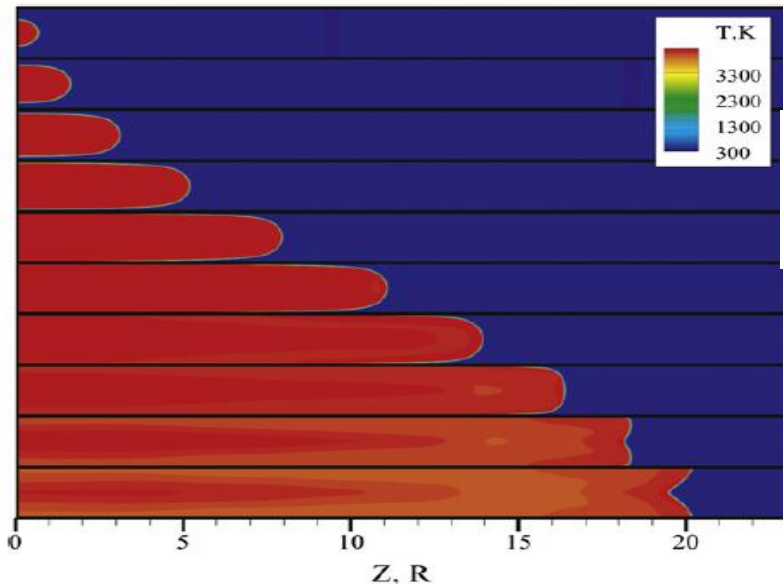


Пристеночная  
поверхность

**Момент времени 100 мс (водородно-воздушная смесь с содержанием водорода 15%)**

ИК камера InfraTec ImageIR 8320. Спектральный диапазон 2-5.7  $\mu\text{m}$

# Распространение пламени в трубе



$$Z_{tip} = \frac{\Theta H}{2\alpha} \sinh \left( 2 \frac{\alpha}{\Theta} \frac{Ct^n}{H} \right) = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{\Theta}{\Theta - 1}} \sinh \left( 2 \sqrt{\frac{\Theta - 1}{\Theta}} \frac{k_{DL}^{n-1}}{H} \left( \frac{\Theta S_L}{n} \right)^n t^n \right).$$

$$\frac{R_f(t)}{H} = \frac{\Theta}{\alpha} \tanh \left( \frac{\alpha}{\Theta} \frac{Ct^n}{H} \right) = \frac{\Theta}{\alpha} \tanh \left( \frac{\alpha}{\Theta H} k_{DL}^{n-1} \left( \frac{\Theta S_L}{n} \right)^n t^n \right),$$

Результаты численного моделирования показывают момент перехода от выпуклого «пальца» к форме вогнутого «тюльпана».

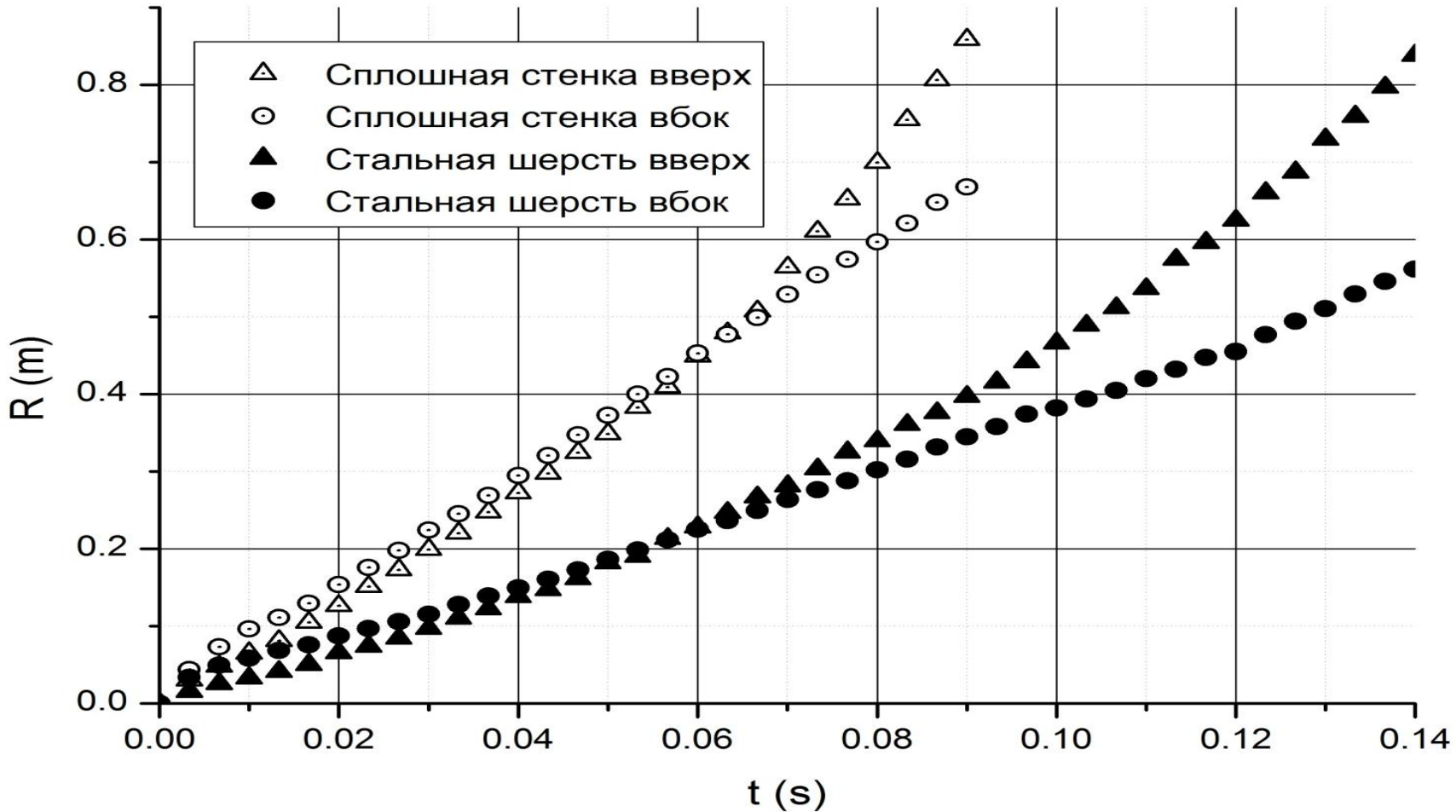
D. Valiev, V. Akkerman, M. Kuznetsov, L.E. Eriksson, C.K. Law, and V. Bychkov (2013)

Аналитические уравнения эволюции переднего края и пристеночной поверхности пламени.

S. Demir, V. Bychkov, S.H.R. Chalagalla, V. Akkerman (2017)

Численные и аналитические исследования подтверждают экспериментальные результаты.

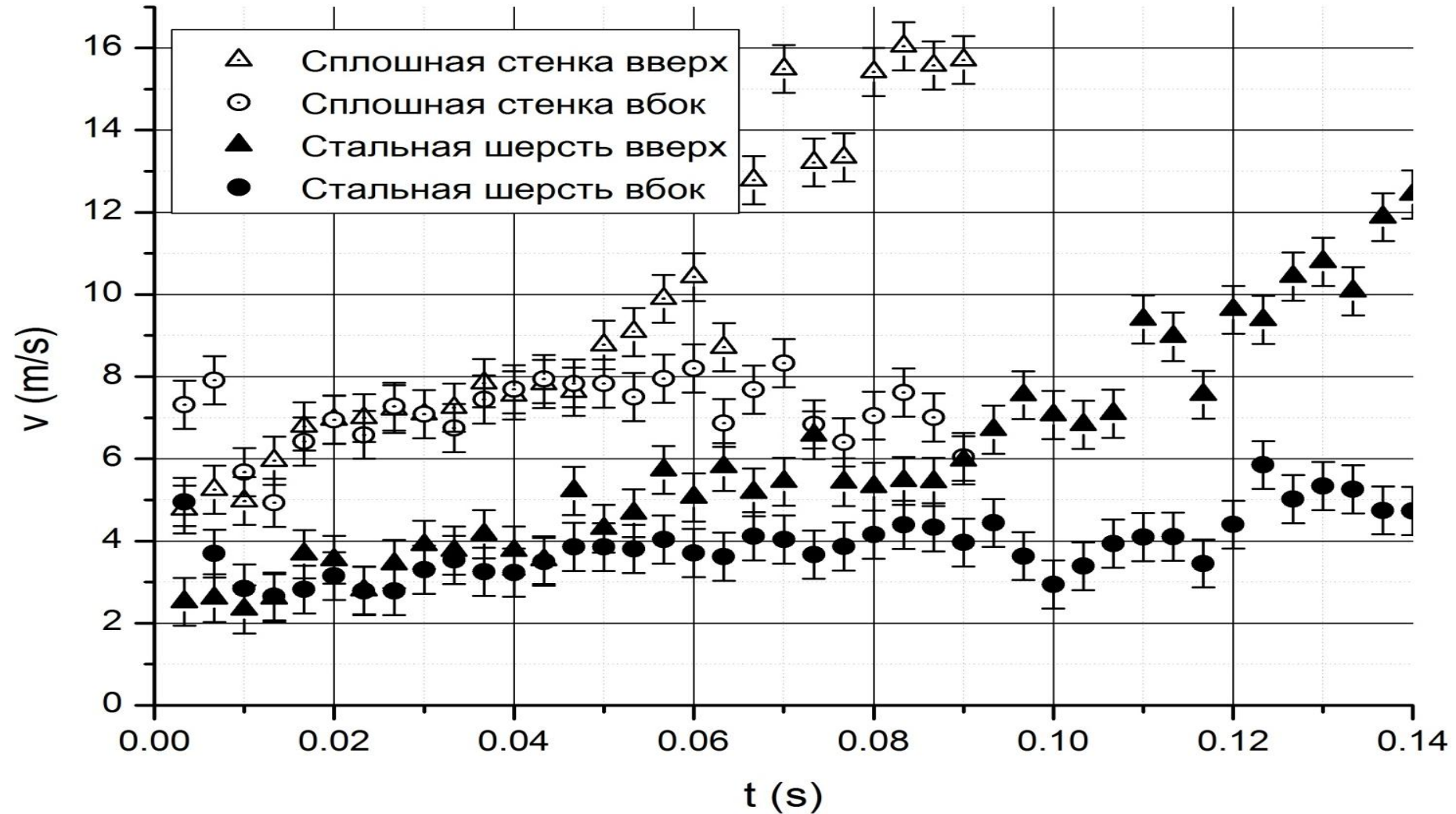
# X-t диаграммы распространения фронта пламени над сплошной стенкой и слоем стальной шерсти



После 60 мс распространения, пламя в горизонтальном направлении замедляется, а в вертикальном резко ускоряется.



# Скорости фронта пламени



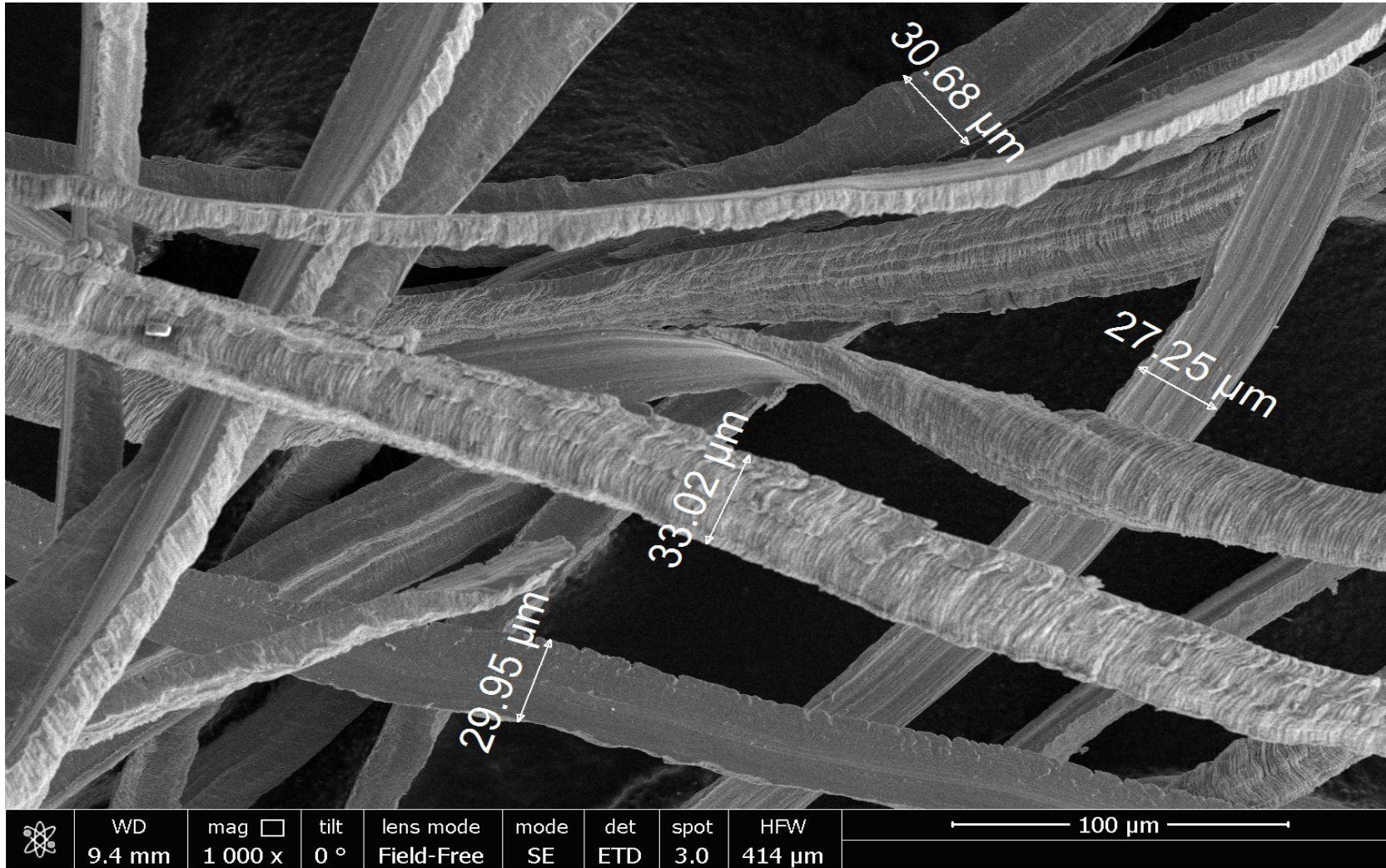
Скорость пламени над слоем стальной шерсти в 2.5 раза ниже, чем над сплошной стенкой. Отношение скоростей одинаково при распространении пламени как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях.



# Исследование структуры стальной шерсти

# Микрофотографии структуры стальной шерсти

(Nova NanoSem 650 сканирующий электронный микроскоп)

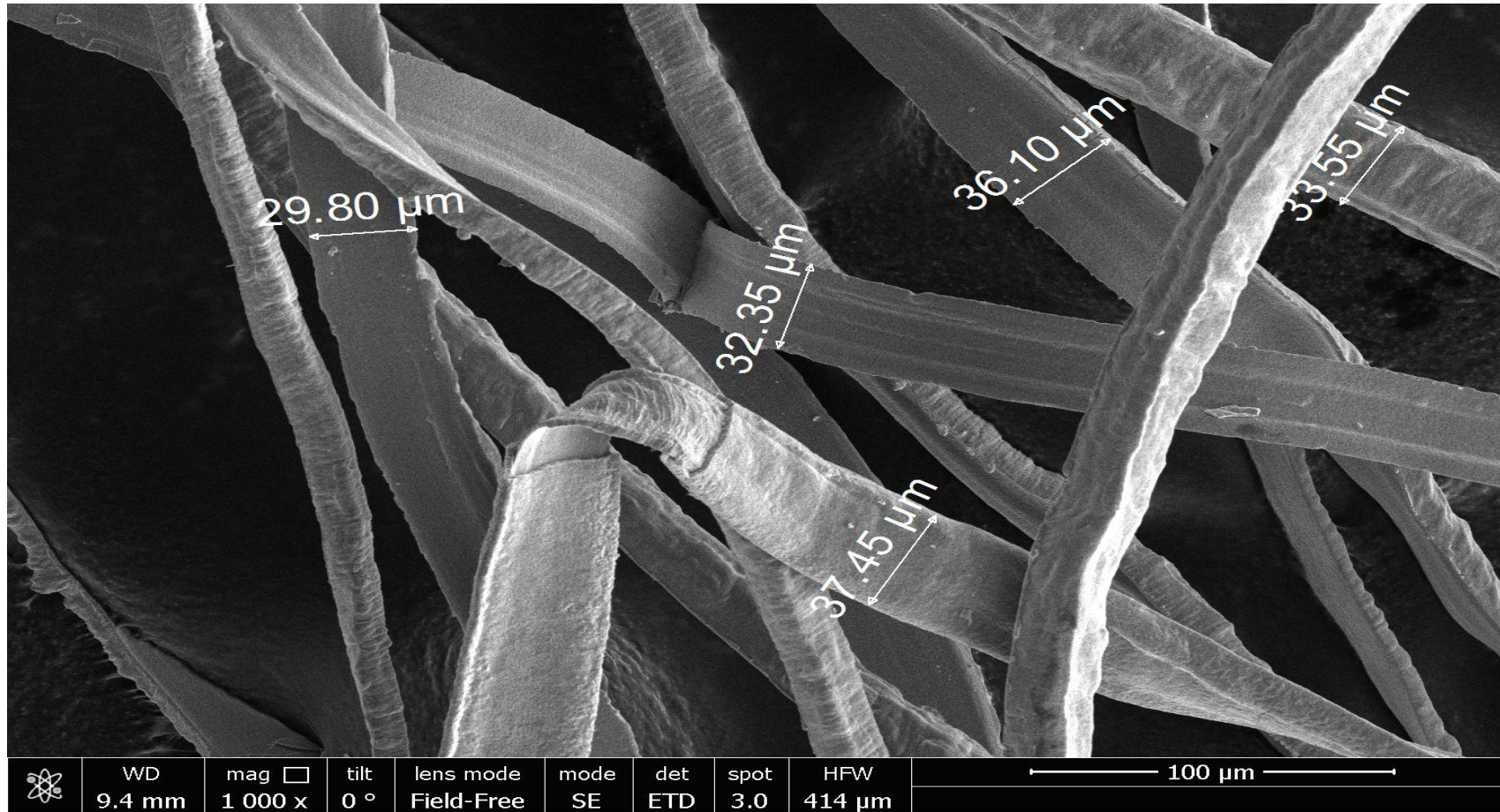


Исходные волокна перед прохождением фронта пламени в форме лент с развитой структурой с одной стороны и гладкой поверхностью с другой.



# Микрофотографии структуры стальной шерсти после прохождения фронта пламени

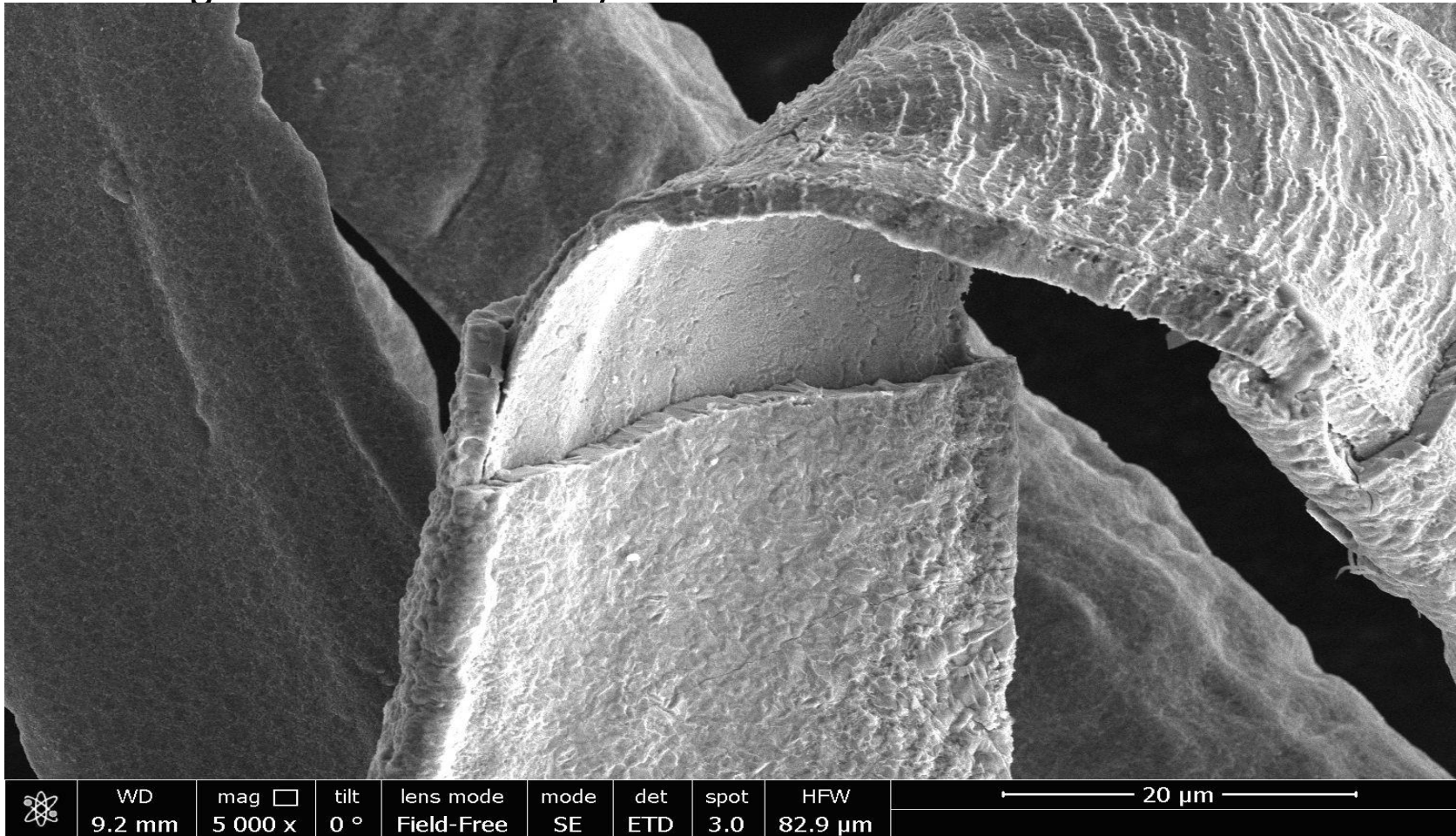
(Nova NanoSem 650 сканирующий электронный микроскоп)



После прохождения фронта пламени волокна покрыты оксидным слоем толщиной около трети толщины волокон.

# Структура стальной шерсти после прохождения пламени с большим увеличением

(Nova NanoSem 650 scanning electron microscope)

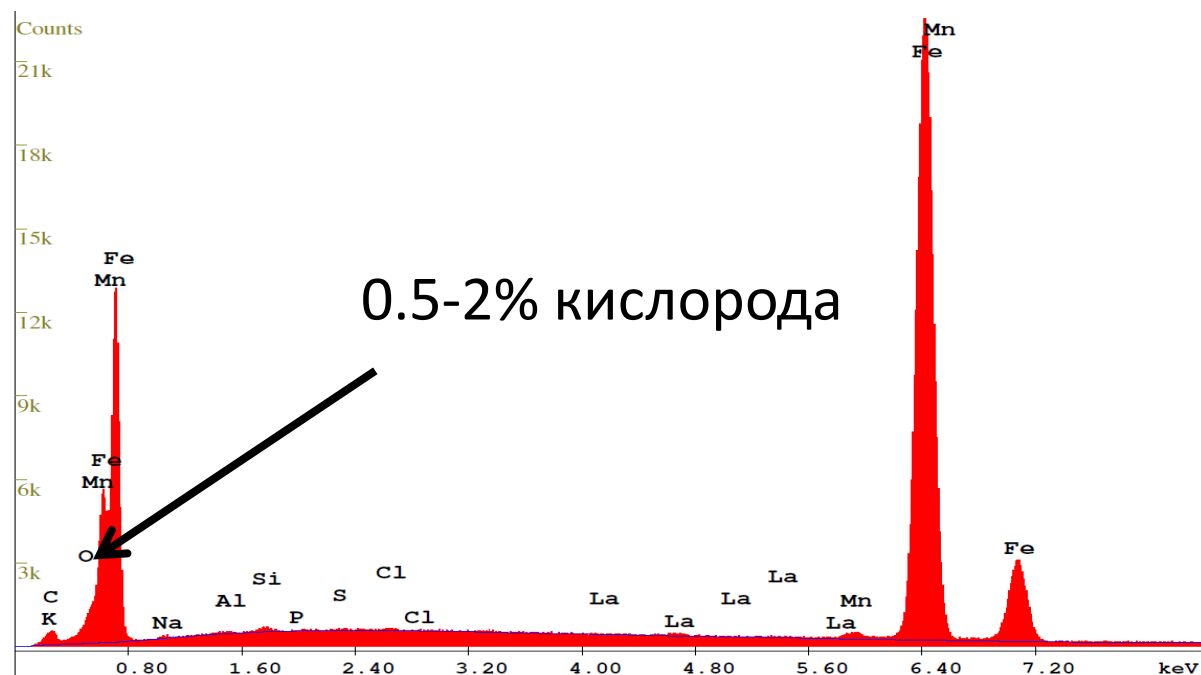


Оксидный, состоящий из частиц размером 200-300 нм,

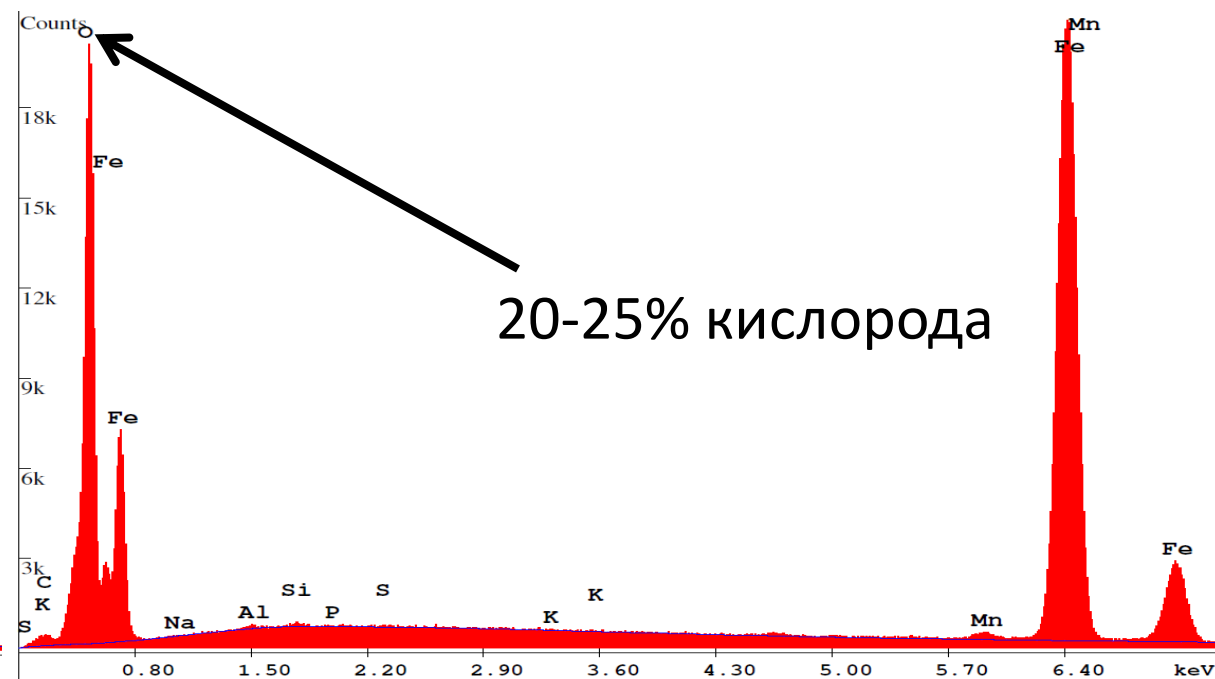
# Изменение спектра стальной шерсти

(Nova NanoSem 650 сканирующий электронный микроскоп с системой энергодисперсионного анализа EDAX)

Спектр стальной шерсти до прохождения фронта пламени



Спектр стальной шерсти после прохождения фронта пламени



В результате прохождения фронта пламени изменяется химический состав стальной шерсти.



# Расчет потерь тепла

# Число Фурье для отдельных волокон и слоя как целого

$$Fo = \frac{\kappa \tau}{\rho c L^2}$$

$$c_w = (1 - \varphi) c_s + \varphi c_g$$

Теплоемкость

$$\rho_w = (1 - \varphi) \rho_s + \varphi \rho_g$$

Плотность

$$\kappa_w = \frac{1}{\frac{1 - \varphi}{\kappa_s} + \frac{\varphi}{\kappa_g}}$$

Теплопроводность

**Отдельные волокна**

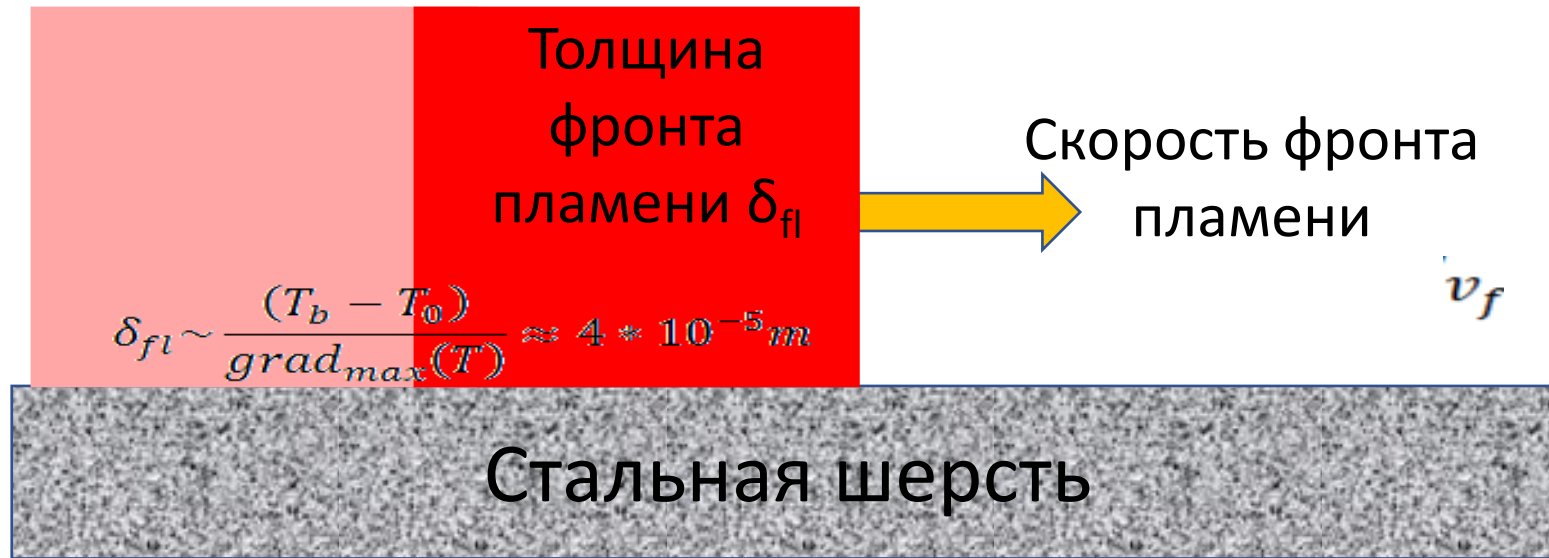
**Слой как целое**

$$Fo_f \cong 10^7$$

$$Fo_w \cong 5 * 10^{-4}$$

Слой стальной шерсти может рассматриваться как сплошная среда с постоянной однородной теплоемкостью и температуропроводностью

# Определение размерности задачи теплопроводности



Толщина теплового слоя в стальной шерсти ?.

Толщина нагретого слоя, распространяющегося перед пламенем, равна

$$\delta_{th} \sim \chi_w / v_f$$

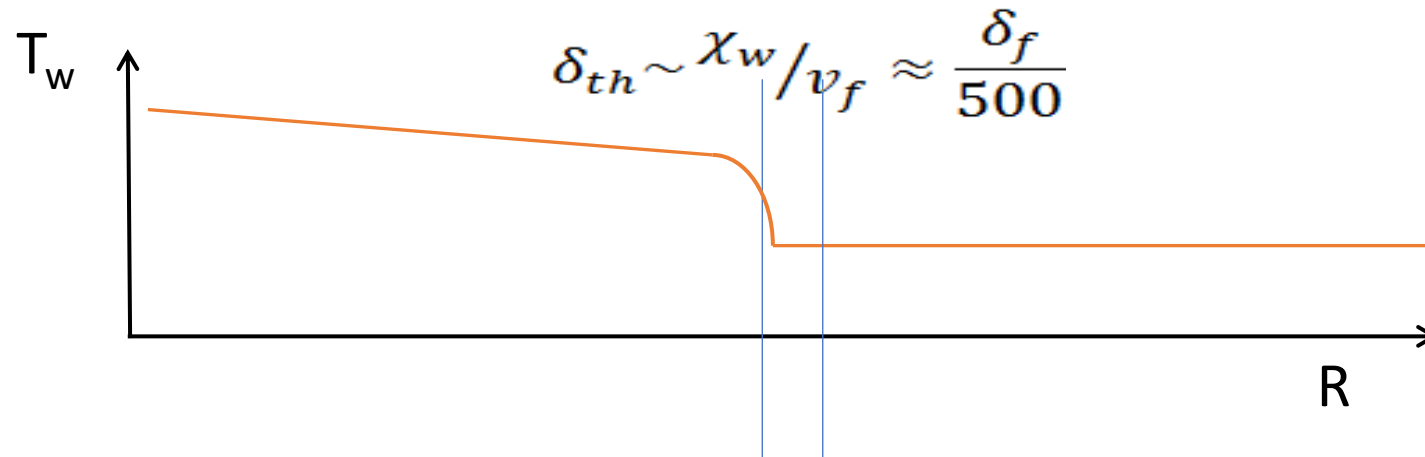
Подставляя температуропроводность стальной шерсти и среднюю скорость распространения пламени

$$\chi_w = 3.8 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$v_f = 5 \text{ m/s}$$

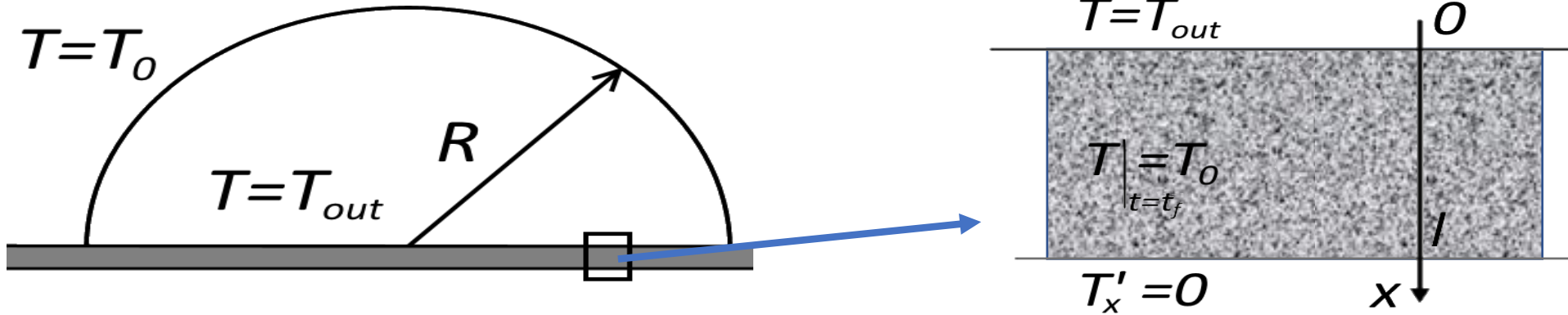
получим толщину прогретого слоя

$$\delta = 7.6 * 10^{-7} \text{ m}$$



Прогретый слой в стальной шерсти в 500 раз тоньше фронта пламени. Таким образом, для оценки можно пренебречь радиальным распространением тепла.

# Распространение тепла по глубине



$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2}, \quad \chi - \text{температуропроводность стальной шерсти}$$

**Граничные условия:**

$$\begin{cases} T(0, t) = T_{out} \\ \frac{\partial T(l, t)}{\partial x} = 0 \end{cases}, \quad \begin{array}{l} T_{out} - \text{температура продуктов} \\ \text{сгорания} \\ l - \text{толщина слоя} \end{array}$$

**Начальные условия:**

$$T(x, t_f) = T_0$$

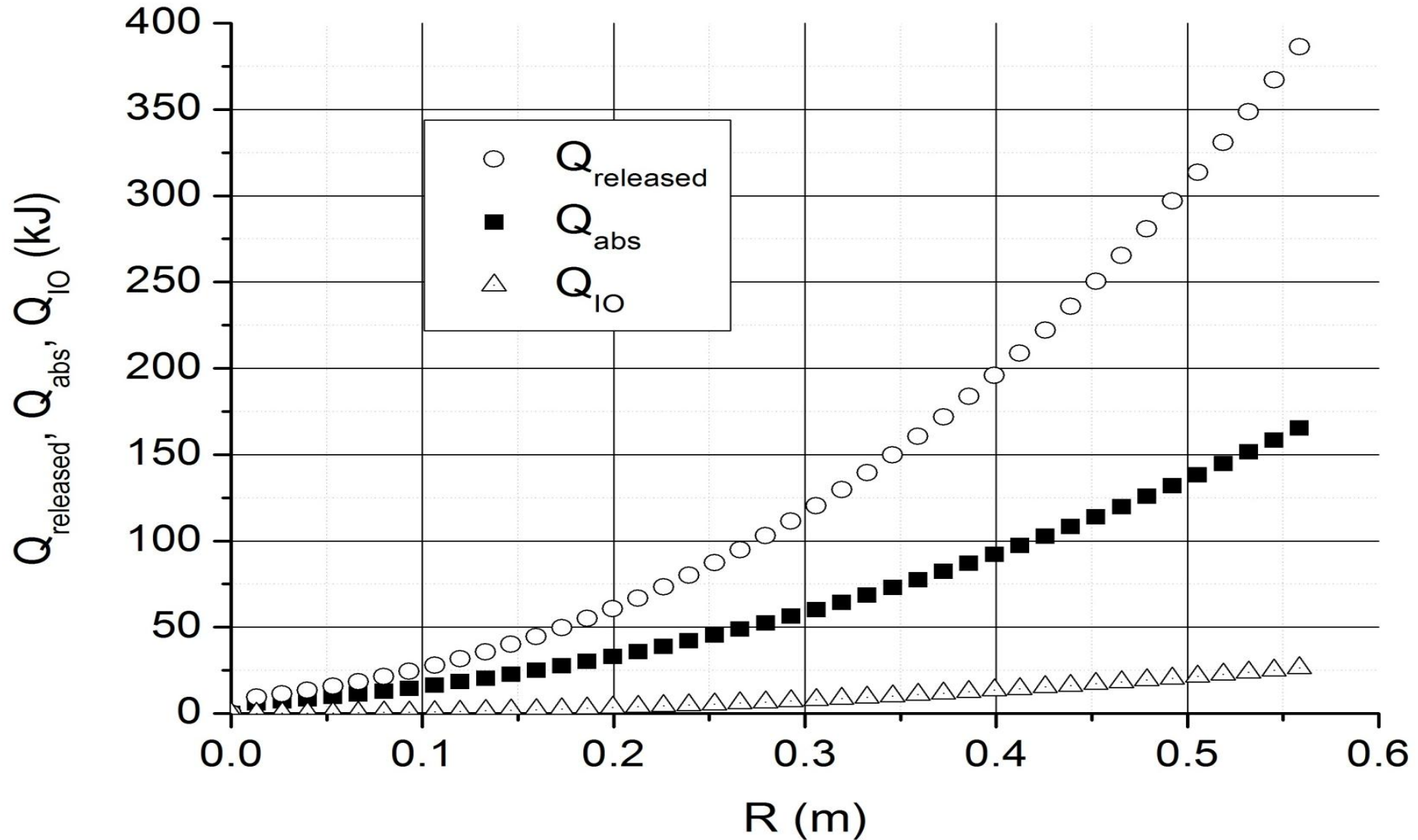
$t_f$  – момент прихода пламени  
 $T_0$  – начальная температура смеси

**Общее решение нестационарного уравнения теплопроводности:**

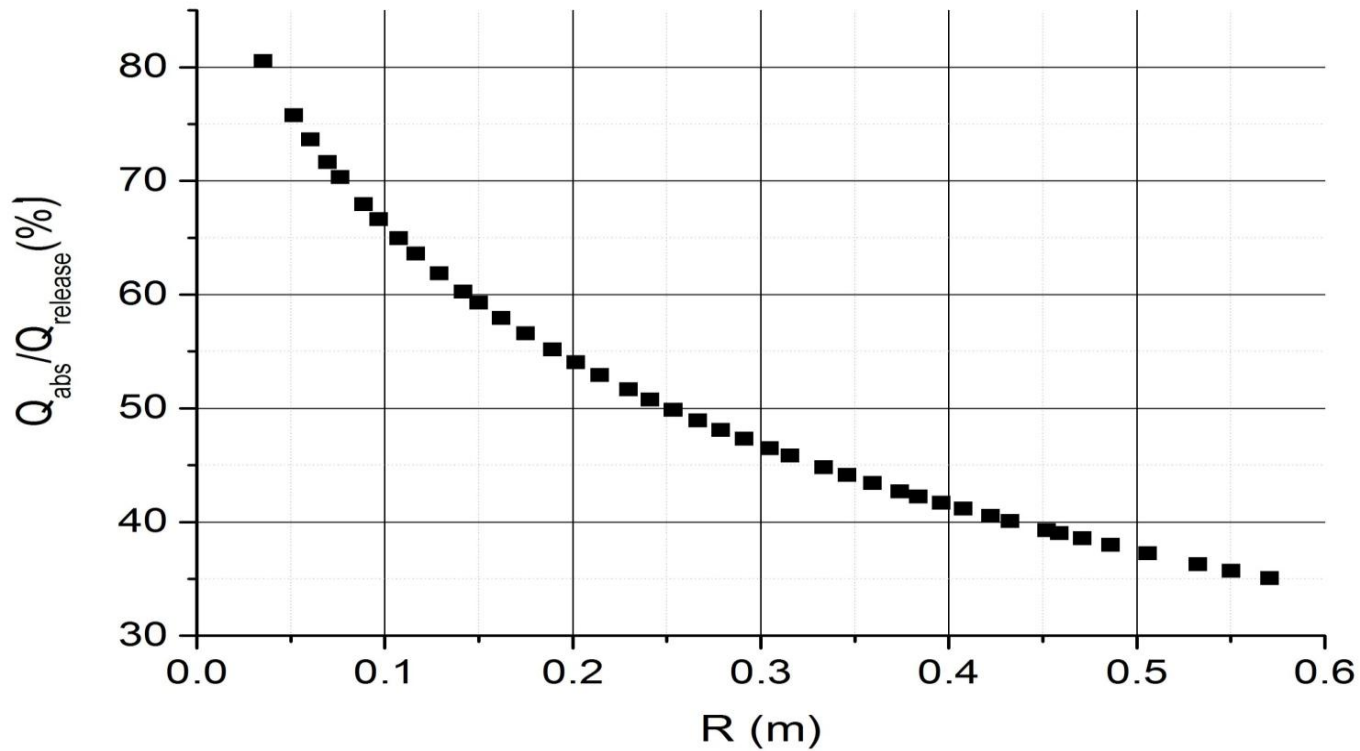
$$T(x, t) = T_{out} - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2(T_{out} - T_0)}{l\lambda_n} \exp(-\chi\lambda_n^2(t - t_f)) \sin(\lambda_n x)$$

где  $\lambda_n = \frac{\pi}{l}(n + 1/2)$

# Зависимости количества тепла выделившегося от сгорания водорода, поглощенного стальной шерстью и от окисления железа



# Доля тепловой энергии, поглощенная покрытием



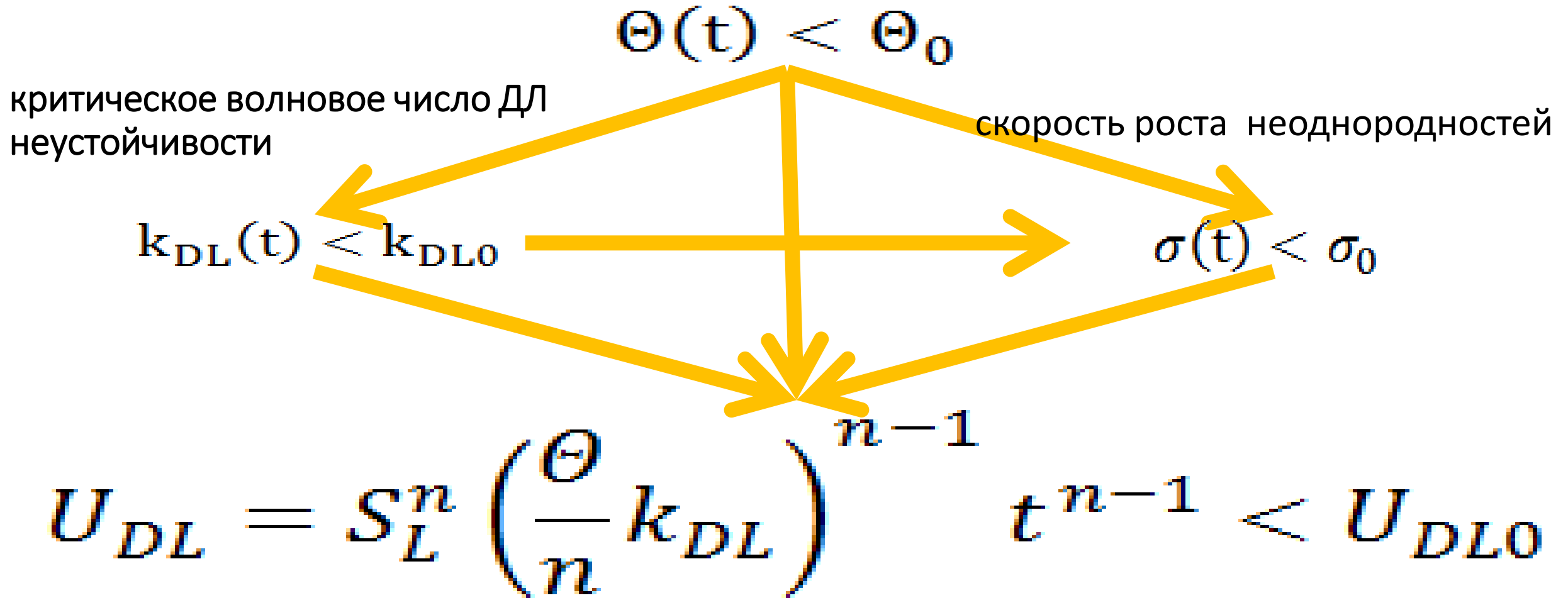
$$\begin{aligned} \Theta(t) &= \frac{\rho_0}{\rho_b(t)} = \rho_0 \left( \frac{1}{\rho_0} \frac{T_0 + \frac{Q_r(t) - Q_{abs}(t)}{c_p}}{T_0} \right) \\ &= \rho_0 \left( \frac{1}{\rho_0} \frac{T_0 + \frac{Q_r(t)}{c_p} - \frac{Q_{abs}(t)}{c_p}}{T_0} \right) \\ &= \rho_0 \left( \frac{1}{\rho_0} \frac{T_0 + \frac{Q_r(t)}{c_p}}{T_0} \right) - \rho_0 \left( \frac{1}{\rho_0} \frac{\frac{Q_{abs}(t)}{c_p}}{T_0} \right) \\ &= \Theta_0 - \rho_0 \left( \frac{1}{\rho_0} \frac{\frac{Q_r(t)}{c_p}}{T_0} \right) \frac{Q_{abs}(t)}{Q_r(t)} \\ &= \Theta_0 - (\Theta_0 - 1) \frac{Q_{abs}(t)}{Q_r(t)} \end{aligned}$$

Доля тепловой энергии, поглощенная покрытием, непостоянна. Поэтому коэффициент теплового расширения продуктов сгорания меняется со временем.

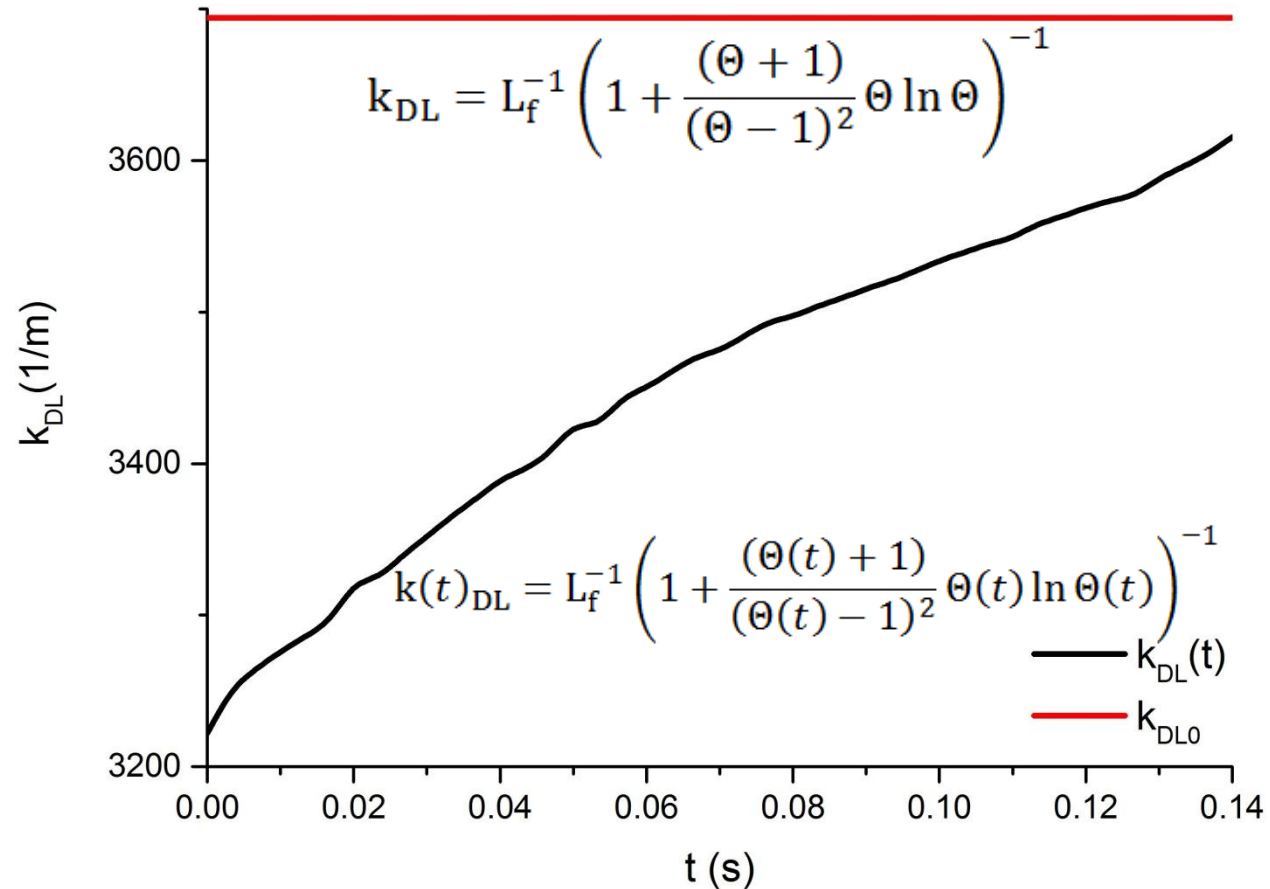
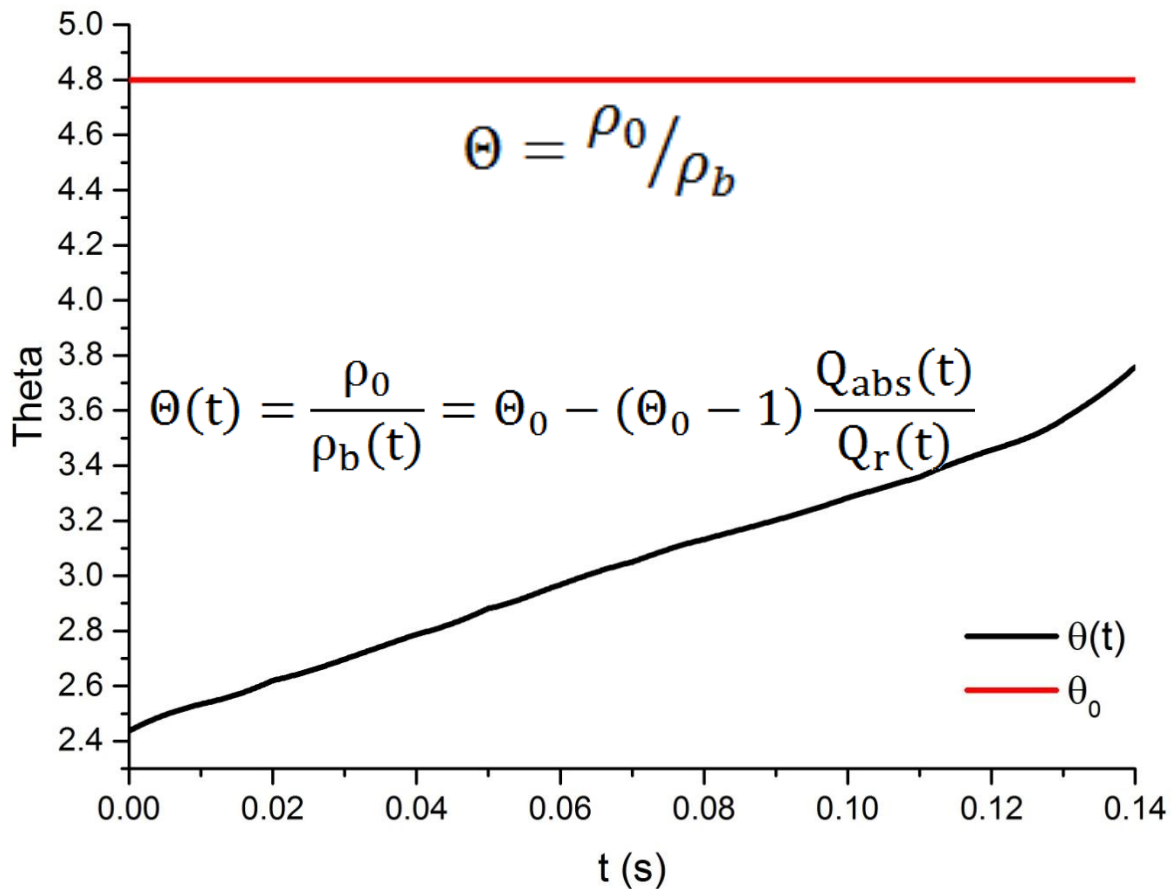


# Адаптация аналитической модели ускорения пламени к условиям отвода тепла

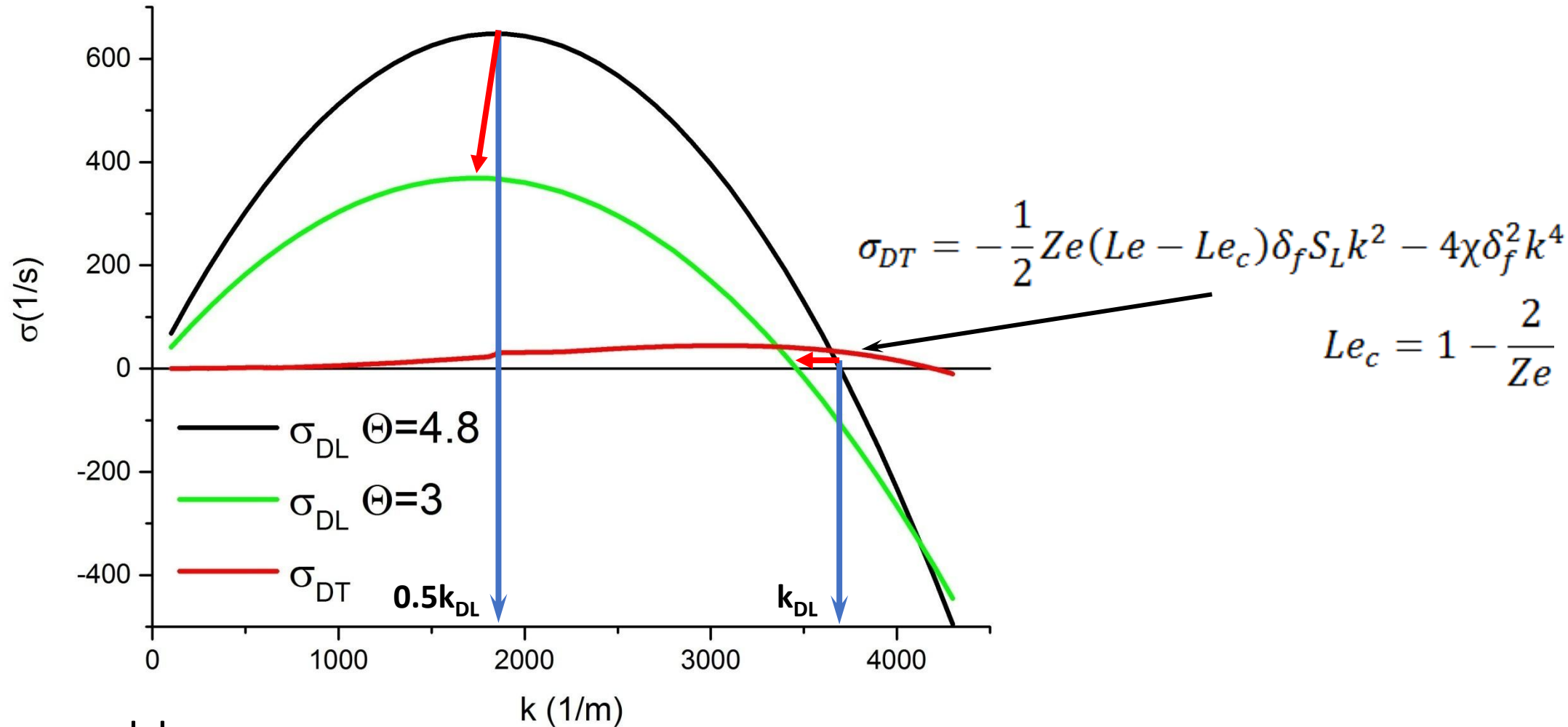
# Коэффициент теплового расширения продуктов сгорания и скорость пламени



# Коэффициент теплового расширения продуктов сгорания и критическое волновое число ДЛ неустойчивости



# Скорость роста неоднородностей



При снижении коэффициента теплового расширения снижается волновое число и снижается скорость роста для неоднородностей всех размеров.

# Аналитическая модель finger flame

Постоянный коэффициент теплового расширения

$$\frac{R_f(t)}{H} = \frac{\Theta}{\alpha} \tanh\left(\frac{\alpha}{\Theta} \frac{Ct^n}{H}\right) = \frac{\Theta}{\alpha} \tanh\left(\frac{\alpha}{\Theta H} k_{DL}^{n-1} \left(\frac{\Theta S_L}{n}\right)^n t^n\right), \quad \alpha = \sqrt{\Theta(\Theta - 1)}$$
$$Z_{tip} = \frac{\Theta H}{2\alpha} \sinh\left(2\frac{\alpha}{\Theta} \frac{Ct^n}{H}\right) = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{\Theta}{\Theta - 1}} \sinh\left(2\sqrt{\frac{\Theta - 1}{\Theta}} \frac{k_{DL}^{n-1}}{H} \left(\frac{\Theta S_L}{n}\right)^n t^n\right) \cdot k_{DL} = L_f^{-1} \left(1 + \frac{(\Theta + 1)}{(\Theta - 1)^2} \Theta \ln \Theta\right)^{-1}$$

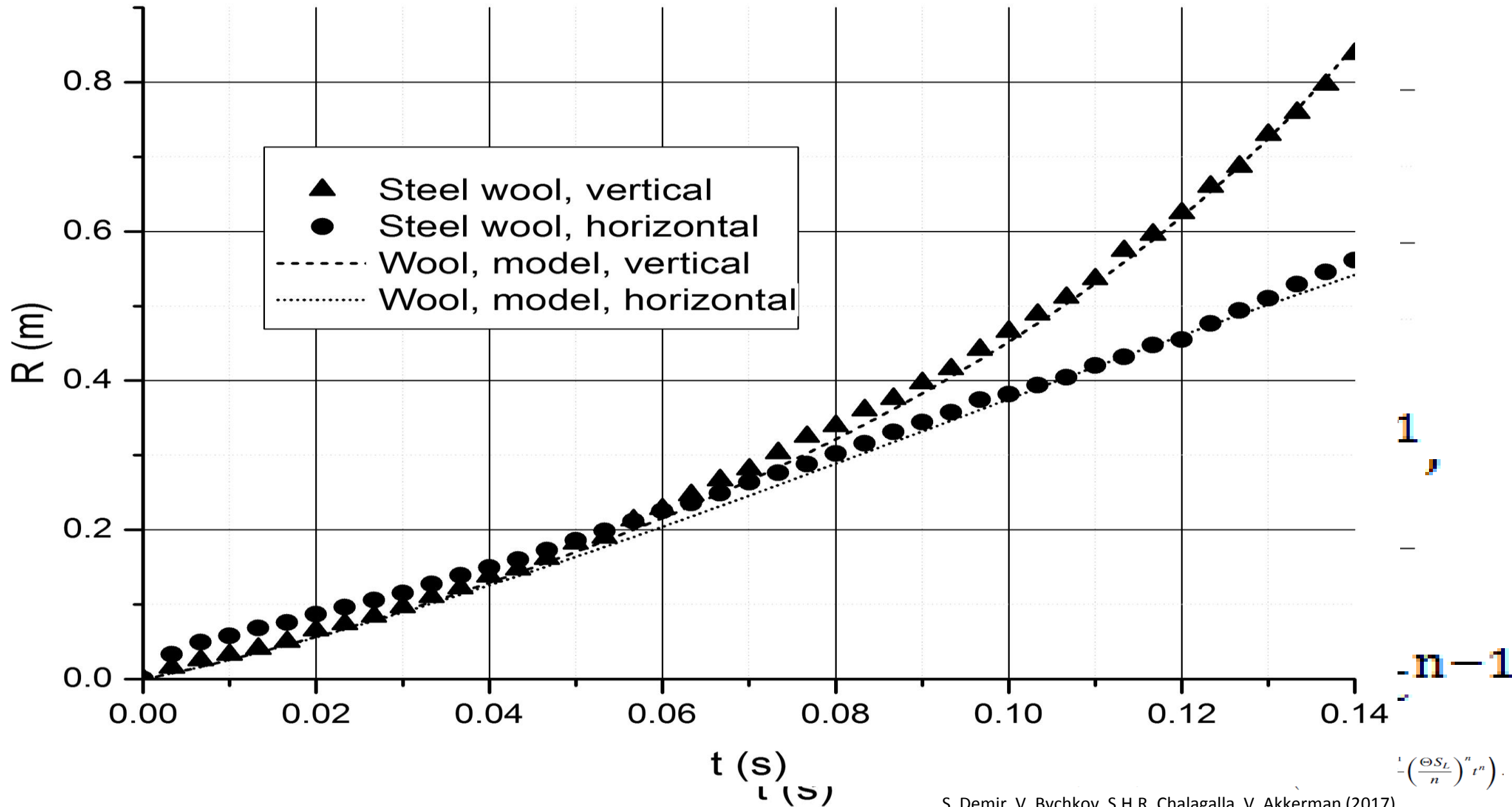
S. Demir, V. Bychkov, S.H.R. Chalagalla, V. Akkerman, Combust. Theory Modell. 21 (2017)

**Адаптация модели к расширению с переменным коэффициентом**

$$\frac{dR_f}{dt} = \left\{ \Theta - (\Theta - 1) \frac{R_f^2}{H^2} \right\} S_L^n \left(\frac{\Theta}{n} k_{DL}\right)^{n-1} t^{n-1},$$
$$\frac{dZ_{tip}}{dt} = \left\{ \Theta + 2(\Theta - 1) \frac{R_f Z_{tip}}{H^2} \right\} S_L^n \left(\frac{\Theta}{n} k_{DL}\right)^{n-1} t^{n-1},$$

В отсутствие зависимости коэффициента теплового расширения от времени в аналитической форме уравнения интегрировались численно.

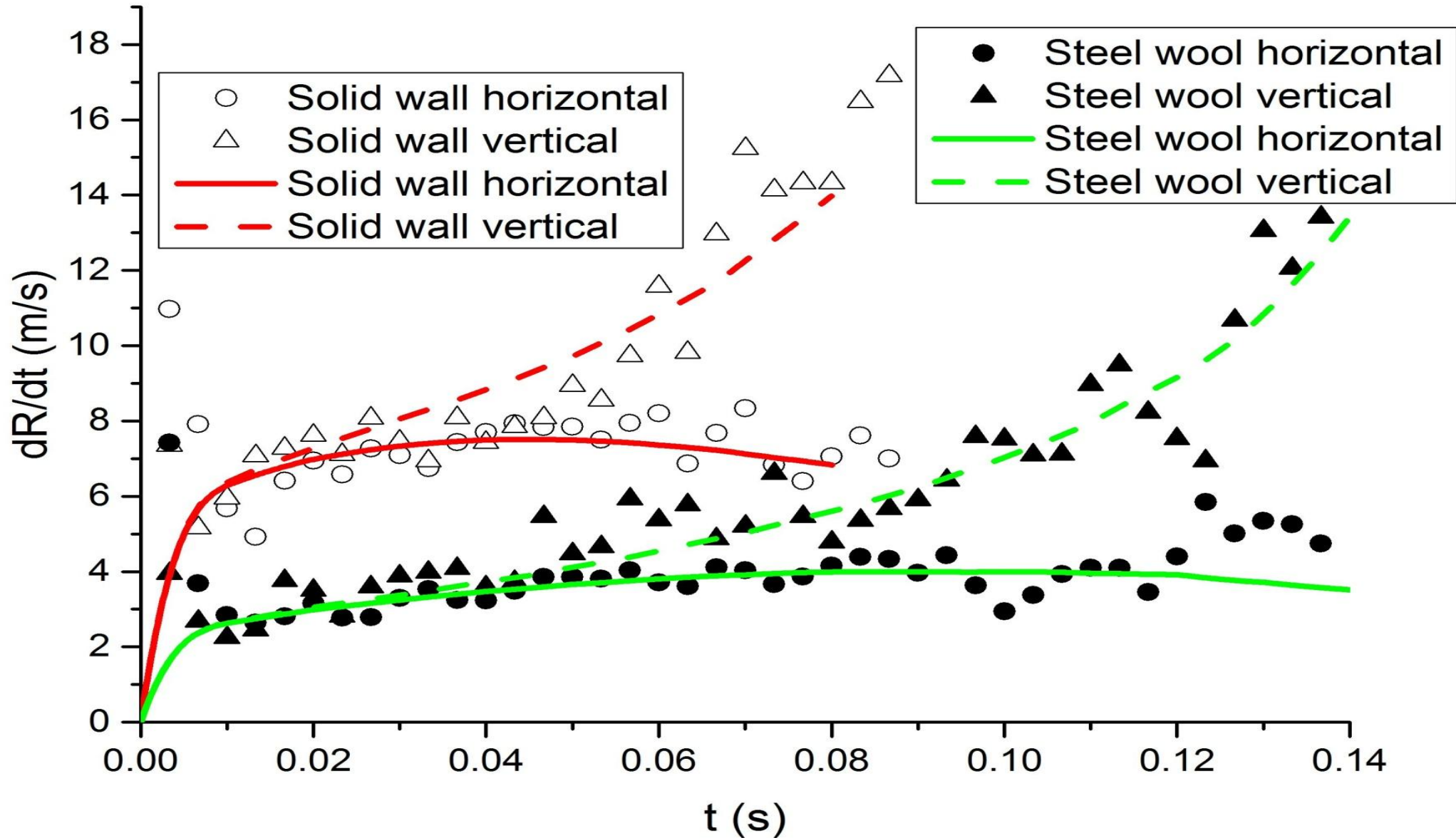
# Сравнение модели с экспериментальными результатами



$$\left(\frac{\partial S_L}{\partial t}\right)^n t^n$$



# Скорость finger flame с отводом тепла



# Заключение 3

- Показана возможность управления ускорением пламени с помощью воздействия на расширение продуктов сгорания и снижения плотности поверхности фронта пламени.
- Обнаружено, что слой стальной шерсти снижает скорость полусферического распространения пламени в 2.5 раза.
- Построена аналитическая модель ускорения пламени, учитывающая неустойчивость и растяжение фронта пламени в условиях отвода тепла.

Спасибо за внимание

# Оценка эксперта combustion institute

...the best experimental work on this subject that I have seen since the time of the classical work by Clanet&Searby [Combust. Flame 105 (1996) 225] on the finger flame phenomenon.

**Reviewer #1**

**Proceedings of the Combustion Institute**

# Уравнение, описывающее турбулентную скорость пламени с учетом различных факторов

$$u_T = \sigma u_L \bar{\varepsilon}_{DT} \bar{\varepsilon}_{DL} \bar{\varepsilon}_{RT} \bar{\varepsilon}_T$$

Каждому фактору соответствует увеличение  
площади фронта пламени

$$\sigma = \frac{\rho_u}{\rho_b}$$

Коэффициент термического расширения

$$\bar{\varepsilon}_{DT}$$

Коэффициент скорости термодифузионной неустойчивости

$$\bar{\varepsilon}_{DL}$$

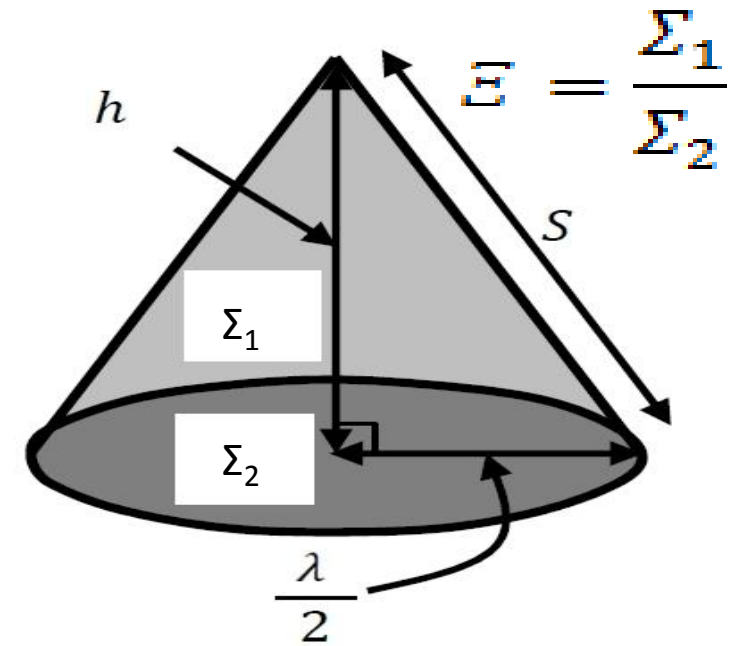
Коэффициент скорости неустойчивости Дарье-Ландау

$$\bar{\varepsilon}_{RT}$$

Коэффициент скорости неустойчивости Рэля-Тейлора

$$\bar{\varepsilon}_T$$

Коэффициент скорости турбулентных пульсаций



Molkov, 2012

# Масштабы и скорости роста основных механизмов неустойчивости

$\%H_2$	$\lambda_{TD}, m$	$\omega_{TD}, s^{-1}$	$\lambda_{DL}, m$	$\omega_{DL}, s^{-1}$	$\lambda_{RT}, m$	$\omega_{RT}, s^{-1}$
15%	$4.5 \cdot 10^{-4}$	1155	$2 \cdot 10^{-3}$	1123	$2.5 \cdot 10^{-2}$	1.02
17%	$4 \cdot 10^{-4}$	945	$1.6 \cdot 10^{-3}$	1749	$9.5 \cdot 10^{-3}$	3.7
20%	$3.4 \cdot 10^{-4}$	355	$1.2 \cdot 10^{-3}$	3193	$2 \cdot 10^{-3}$	23.4